

**UNIVERSIDAD DE CÁDIZ**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS MARINA, NAÚTICA Y  
RADIOELECTRÓNICA – EIMANAR**

**DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES  
TÉRMICOS**



---

**UNIFICACIÓN DE CRITERIOS EN  
PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO DE  
EMISIONES Y CONSUMO ENERGÉTICO EN EL  
TRANSPORTE MARÍTIMO. PROPUESTA DE  
UN MODELO ESPECÍFICO POR PASAJERO Y  
TONELADA TRANSPORTADA**

---

**TESIS DOCTORAL**

Emilio Pájaro Velázquez

Cádiz, diciembre 2019





ESTA TESIS DOCTORAL HA SIDO REALIZADA DENTRO DEL DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS, DE LA ESCUELA DE INGENIERÍAS MARINA, NÁUTICA Y RADIOELECTRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE CÁDIZ.

LA DIRECCIÓN DE LA MISMA HA SIDO REALIZADA POR LA DOCTORA CRISTINA VANESSA DURÁN GRADOS Y EL DOCTOR D. JUAN MORENO GUTIÉRREZ

PROGRAMA DE DOCTORADO: CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS MARINAS  
LÍNEA: EFICIENCIA ENERGÉTICA Y AMBIENTAL Y MEJORAS TECNOLÓGICAS DE INSTALACIONES MARINAS.





La Doctora Doña Cristina Vanessa Durán Grados y el Doctor Don Juan Moreno Gutiérrez, Profesores del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Cádiz como sus directores,

HACEN CONSTAR:

Que esta memoria, titulada “UNIFICACIÓN DE CRITERIOS EN PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO DE EMISIONES Y CONSUMO ENERGÉTICO EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO. PROPUESTA DE UN MODELO ESPECÍFICO POR PASAJERO Y TONELADA TRANSPORTADA”, presentada por Don Emilio Pájaro Velázquez contempla su trabajo de Tesis Doctoral y, considerando que reúne todos los requisitos legales, autoriza su presentación y defensa para optar al grado de Doctor por la Universidad de Cádiz.

Puerto Real,        de        de 20\_\_\_\_

Fdo.: Cristina Vanesa Durán Grado

Fdo.: Juan Moreno Gutiérrez



El Profesor Dr. D. Francisco Sánchez de la Flor, Director del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Cádiz

HACE CONSTAR:

Que esta memoria, titulada “UNIFICACIÓN DE CRITERIOS EN PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO DE EMISIONES Y CONSUMO ENERGÉTICO EN EL TRANSPORTE MARÍTIMO. PROPUESTA DE UN MODELO ESPECÍFICO POR PASAJERO Y TONELADA TRANSPORTADA”, presentada por Don Emilio Pájaro Velázquez bajo la dirección de la Dra. Cristina Vanesa Durán Grados y el Dr. Juan Moreno Gutiérrez, reúne todos los requisitos legales para optar al grado de Doctor por la Universidad de Cádiz.

Puerto Real,        de        de 20\_\_\_\_

Fdo.: Francisco Sánchez de la Flor



# AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias en primer lugar a mis directores de tesis, a mi directora, la Dra. Cristina Vanessa Durán Grados, por creer en mí desde el principio, por su apoyo incondicional y enorme dedicación, sin los cuales no hubiera sido posible realizar este trabajo. Al Dr. Juan Moreno Gutiérrez, porque gracias a él estoy donde estoy, por guiarme en esta aventura desde el comienzo y marcarme el camino, porque ha sido y será siempre mi referente y ejemplo a seguir.

Un especial agradecimiento a Thierry Blommaerts, por su gran disponibilidad para ayudar, por su colaboración desinteresada, por ser un gran profesional y mejor persona.

Quiero tener un agradecimiento para mi grupo de investigación, compañeros de viaje durante estos años que han estado ahí en los buenos y malos momentos, juntos conseguiremos lo que nos propongamos.

Dar las gracias también a mi familia y amigos, porque sus ánimos y cariño me han acompañado a lo largo de todo este tiempo.



*A mis padres Teresa y Emilio, porque me lo han dado todo y gracias a ellos tengo los valores y los principios que me hacen ser quien soy.*

*A mi compañera y esposa Olga, porque has sido mi fuerza y has compartido mis nervios y preocupaciones.*

*A mi familia y amigos, por estar siempre ahí y apoyarme constantemente.*

*A mi hijo Víctor, porque con tu llegada me diste la fuerza y la ilusión, llenando mi vida de la felicidad que necesitaba para alcanzar mis metas y terminar esta tesis doctoral.*





# RESUMEN

El sector del transporte marítimo se enfrenta actualmente a la necesidad de reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera, y consecuentemente minimizar sus consumos energéticos. Los primeros pasos para poder avanzar en esta dirección consisten en poder realizar estudios que permitan obtener información de la actividad que se está realizando con la mayor precisión posible.

Existen muchas investigaciones sobre los diferentes medios de transporte que permiten realizar estudios de impacto medioambiental y de eficiencia energética, pero cuando se refiere al transporte marítimo, no hay una unificación de criterios a la hora de desarrollar las estimaciones de consumos y emisiones, lo que dificulta la posibilidad de poder contrastar los resultados y compararlos con los de otros sectores.

Muchas de las metodologías utilizadas para los inventarios de emisiones asumen como valores constantes parámetros fundamentales, tales como los factores de carga o los consumos específicos, cuando realmente no lo son. A lo largo de este estudio estas premisas serán analizadas y discutidas desarrollando un modelo que ofrezca estimaciones de mayor calidad.

Esta tesis doctoral propone una metodología que permite calcular el consumo energético y las emisiones contaminantes de los buques por cada pasajero y tonelada que se transporta, y por unidad de distancia navegada, basándose en datos operacionales. De esta forma se consigue dar una visión más realista del consumo y las emisiones en función de la intensidad de trabajo realizado y permite extrapolar dicho método a otros buques y zonas marítimas diferentes, lo cual es fundamental cuando se quiere hacer valoraciones entre distintos medios de transporte o estudios de transporte intermodal. A partir de cuatro de las metodologías existentes (EPA, IMO, Jalkanen y MAN) se ha desarrollado un modelo optimizado que minimiza el margen de incertidumbre en los resultados.

Para llevar a cabo esta investigación se ha analizado la actividad desarrollada por dos buques tipo Ro-Pax que navegan en la zona marítima del Estrecho de Gibraltar durante un periodo de tiempo determinado recopilando información directamente de la operativa de los propios barcos.

Mediante los resultados obtenidos se puede apreciar que los datos de consumo energético y de emisiones contaminantes por cada pasajero y tonelada que se transporta ofrecen una información de gran utilidad para la optimización de la eficiencia energética del sector del transporte marítimo y permiten valorar el impacto ambiental generado, ayudando a tomar decisiones para poder cumplir con la actuales y futuras legislaciones.

**Palabras clave:** Eficiencia Energética, Emisiones Contaminantes, Transporte Marítimo, Pasajero, Tonelada, Ro-Pax

# ABSTRACT

The maritime transport sector is currently facing the need to reduce air pollution emissions into the atmosphere, and, consequently, minimise its energy consumption. In order to work in this direction, the first step is to carry out studies that will allow us to obtain information about the activities which are being performed as accurately as possible.

There is a great deal of research on the different means of transport which allow environmental impact and energy efficiency studies to be conducted, but when it comes to maritime transport, there is no unification of criteria when developing consumption and emission estimates, which makes it difficult to contrast the results and compare them with those of other sectors.

Many of the methodologies used for emission inventories assume as constant values fundamental parameters, such as load factors or specific consumption, when they actually are not. Throughout this study, these premises will be analysed and discussed in order to develop a model that offers higher quality estimates.

This doctoral thesis proposes a methodology that calculates the energy consumption and pollutant emissions of ships per passenger and ton that is transported, and per unit of distance sailed, on the basis of operational data. In this way, it is possible to give a more realistic view of consumption and emissions based on the intensity of work performed and allows the extrapolation of this method to other ships and to different maritime areas, which is essential when you want to make assessments between different means of transport or intermodal transport studies. Based on four of the existing methodologies (EPA, IMO, Jalkanen and MAN) it has been developed an optimised model that minimises the margin of uncertainty in the results.

In order to conduct the present research, the activity performed by two Ro-Pax ships sailing in the maritime area of the Strait of Gibraltar during a specific period of time has been analysed, collecting information directly from the ships' operation.

Through the results obtained, it can be seen that the data of energy consumption and polluting emissions per passenger and ton transported offer very useful information for the optimization of the energy efficiency of the maritime transport sector and allow the assessment of the environmental impact generated, helping to make decisions in order to comply with current and future legislation.

**Keywords:** Energy Efficiency, Pollutant Emissions, Maritime Transport, Ro-Pax, Passenger, Ton



# Índice General

Listado de Ilustraciones .....	19
Listado de Gráficos .....	20
Listado de Tablas .....	22
Listado de Ecuaciones.....	25
Listado de Acrónimos .....	26
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>30</b>
Introducción y justificación .....	30
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>40</b>
Hipótesis y Objetivos .....	40
Hipótesis Planteadas.....	40
Objetivos .....	42
<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>46</b>
Antecedentes .....	46
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>70</b>
Metodología .....	70
Cálculo de Consumo de Combustible .....	81
Navegación Crucero .....	81
Navegación SRZ (Speed-Restricted Zone) .....	87
Atrake y Desatraque .....	88
Carga y Descarga.....	88
Calculo de Emisiones Contaminantes .....	89
Cálculos por Pasajero y Carga transportada.....	93
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>98</b>
Resultados .....	98
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>124</b>
Discusión.....	124
<b>Capítulo 7 .....</b>	<b>142</b>
Conclusiones .....	142
<b>Capítulo 8 .....</b>	<b>146</b>
Propuestas de Futuro .....	146
Combustibles Basados en el Carbono y Reducción de Emisiones .....	149
Combustibles Alternativos .....	151

Biofuel .....	152
Hidrógeno .....	153
Fuel Sintético (e-Fuel) .....	154
Nuclear.....	155
Medidas Tecnológicas para la Reducción de Carbono .....	156
Baterías .....	156
Pilas de Combustible o Fuel Cells .....	157
Energía Eólica (Wind Assistance) .....	158
Energía Solar (Solar Assistance) .....	159
Reducción de Velocidad (Slow Steaming).....	159
Pinturas y Tratamientos Anti-Fouling .....	160
Recuperación de Energía Residual (Waste Heat Recovery) .....	160
<b>Referencias .....</b>	<b>163</b>
<b>Anexo I.....</b>	<b>170</b>
Proyectos de Investigación.....	170
<b>Anexo II.....</b>	<b>174</b>
Artículo Publicado .....	174

## **LISTADO DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1. Estrecho de Gibraltar, ruta marítima Algeciras - Tánger .....	70
Ilustración 2. Cálculo de Energía Consumida y Emisiones Contaminantes .....	78

# LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Transporte y actividad logística. fuente: decarbonising freight transport. The logistics conference Milan (mckinnon, 2010) .....	32
Gráfico 2. Previsiones de Emisiones de CO <sub>2</sub> hasta el año 2050. fuente: World Energy Outlook (IEA, 2009b).....	33
Gráfico 3. Comparativa de Consumos Totales de MMPP y MMAA entre las diferente metodologías estudiadas .....	77
Gráfico 4. Modos de Navegación por duración de un trayecto .....	99
Gráfico 5. SFOC Motores Principales.....	100
Gráfico 6. SFOC Motores Auxiliares .....	101
Gráfico 7. Consumos de Combustibles total en kilogramos por trayecto .....	102
Gráfico 8. Porcentajes de Emisiones Contaminantes de MMPP .....	104
Gráfico 9. Porcentajes de Emisiones Contaminantes de MMAA .....	105
Gráfico 10. Kilogramos de Emisiones de MMAA por tipo de combustible utilizado .	106
Gráfico 11. Emisiones Contaminantes de MMPP y MMAA por trayecto completo...	107
Gráfico 12. Pasajeros Transportados durante el periodo de estudio por el buque "A"	108
Gráfico 13. Pasajeros Transportados durante el periodo de estudio por el buque "B".	108
Gráfico 14. Consumos de Combustibles totales por trayecto y pasajero .....	109
Gráfico 15. Emisiones Totales por trayecto en kilogramos de contaminante por pasajero .....	111
Gráfico 16. Carga Rodada transportada por el buque "A" en el periodo de estudio por trayecto .....	112
Gráfico 17. Carga Rodada transportada por el buque "B" en el periodo de estudio por trayecto .....	112
Gráfico 18. Consumo de Combustible totales por tonelada transportada y trayecto ...	113
Gráfico 19. Emisiones Totales en kilogramo de contaminante por tonelada de carga y por trayecto .....	115
Gráfico 20. Consumos Totales por pasajero transportado y milla náutica navegada...	116
Gráfico 21. Emisiones Totales de MMPP y MMAA en kilogramo de contaminante por pasajero y milla náutica navegada .....	118



Gráfico 22. Consumos Totales de combustible por tonelada de carga transportada y milla náutica navegada.....	119
Gráfico 23. Emisiones Totales de MMPP y MMAA en kilogramo de contaminante por tonelada transportada y milla náutica navegada.....	121
Gráfico 24. SFOC de MMPP en modo de navegación-crucero durante el periodo de estuio de ambos buques.....	126
Gráfico 25. Consumos Energéticos de MMPP en fase de navegación por trayecto durante el periodo de estudio.....	127
Gráfico 26. Consumo Energético de MMPP en Navegación durante el inicio de la OPE en kilogramos de RO por tonelada y milla náutica .....	129
Gráfico 27. Comparativa de Emisiones totales en situación de alta y baja intensidad de pasajeros trnsportados en gramos de contaminante por pasajero y milla náutica .....	134
Gráfico 28. Comparativa de Emisiones totales en situación de alta y baja intensidad de carga transportada en gramos de contaminante por pasajero y milla náutica .....	138

# LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Zonas de control de emisiones. (IMO, 2015) .....	52
Tabla 2. Límites de azufre permitido en combustibles. (IMO, 2015) .....	53
Tabla 3. Niveles de emisiones óxidos de nitrógeno. (IMO, 2015).....	53
Tabla 4. Límites de emisiones óxidos de nitrógeno Tier I-III. (MARPOL Anexo VI). 54	
Tabla 5. Comparativa entre las diferentes metodologías estudiadas para obtener el modelo utilizado. (Moreno-Gutiérrez, et al., 2019).....	71
Tabla 6. Comparación entre incertidumbres de sistema AIS y método de estudio. ....	73
Tabla 7. Comparativa de consumos de MMPP entre las metodologías estudiadas y la propuesta de modelo .....	75
Tabla 8. Comparativa de consumos de MMAA entre las metodologías estudiadas y la propuesta de modelo .....	76
Tabla 9. Comparativa de emisiones totales entre los diferentes métodos analizados ....	77
Tabla 10. Características de los diferentes modos según la base de datos de a bordo (tamaño de la muestra: 3.093 trayectos).....	80
Tabla 11. SFCO base para los motores del caso de estudio .....	87
Tabla 12. Factores de emisión usados para el estudio. (Goldsworthy & Galbally, 2011) .....	91
Tabla 13. Coeficientes de algoritmo para los factores de emisión de los MMPP a bajas cargas .....	92
Tabla 14. Factores de ajuste para bajas cargas calculados .....	92
Tabla 15. Pesos aproximados de la carga transportada .....	95
Tabla 16. Tiempos y Distancias de cada fase de navegación.....	99
Tabla 17. Consumos Específicos calculados para cada modo de navegación.....	100
Tabla 18. Consumo Energético de Motores Principales por trayecto .....	101
Tabla 19. Consumo Energético de Motores Auxiliares por trayecto .....	102
Tabla 20. Emisiones Contaminantes de Motores Principales por trayecto .....	103
Tabla 21. Emisiones Contaminantes de Motores Auxiliares por trayecto .....	104
Tabla 22. Valores promedio de Emisiones totales de MMPP y MMAA por trayecto .	106

Tabla 23. Consumo Energético por trayecto en kilogramos de combustible por pasajero transportado .....	109
Tabla 24. Emisiones de MMPP por gramo de contaminante y pasajero transportado .	110
Tabla 25. Emisiones de MMAA por gramo de contaminante y pasajero transportado	110
Tabla 26. Consumo de Combustible por tonelada de carga transportada en cada trayecto .....	113
Tabla 27. Emisiones Contaminantes de MMPP por tonelada transportada en cada trayecto .....	114
Tabla 28. Emisiones de MMAA en gramos de contaminante por tonelada transportada .....	114
Tabla 29. Consumos de Combustible por pasajero transportado y milla náutica navegada .....	116
Tabla 30. Emisiones contaminantes de los MMPP por cada pasajero transportado y milla náutica navegada.....	117
Tabla 31. Emisiones Contaminantes de los MMAA por cada pasajero transportado y milla náutica navegada.....	117
Tabla 32. Consumos de Combustible totales de MMPP y MMAA por tonelada transportada y milla náutica navegada.....	118
Tabla 33. Emisiones en gramos de contaminante de MMPP por cada tonelada transportada y milla náutica navegada .....	120
Tabla 34. Emisiones en gramos de contaminante de MMAA por cada tonelada transportada y milla náutica navegada.....	120
Tabla 35. Consumos en situación de baja intensidad de pasajeros transportados en gramos de combustible por pasajero y milla náutica .....	131
Tabla 36. Consumos en situación de alta intensidad de pasajeros transportados en gramos de combustible por pasajero y milla náutica .....	132
Tabla 37. Emisiones de MMPP y MMAA en situación de baja intensidad de pasajeros transportados en gramos de contaminante por pasajero y milla náutica .....	133
Tabla 38. Emisiones de MMPP y MMAA en situación de alta intensidad de pasajeros transportados en gramos de contaminante por pasajero y milla náutica .....	133
Tabla 39. Consumos en situación de baja intensidad de carga transportada en gramos de combustible por tonelada y milla náutica .....	135
Tabla 40. Consumos en situación de alta intensidad de carga transportada en gramos de combustible por tonelada y milla náutica .....	136

Tabla 41. Emisiones de MMPP y MMAA en situación de baja intensidad de carga transportada en gramos de contaminante por tonelada y milla náutica..... 137

Tabla 42. Emisiones de MMPP y MMAA en situación de alta intensidad de carga transportada en gramos de contaminante por tonelada y milla náutica..... 137

## LISTADO DE ECUACIONES

1 - Índice de Eficiencia Energética Operacional para un trayecto .....	57
2 - Índice de Eficiencia Energética Operacional para varios trayectos .....	57
3 - Energía Consumida en gramos de combustible .....	81
4 - Factor de Carga y Potencia Instantánea (EPA) .....	82
5 - Potencia Instantanea con margen de seguridad (STEAM).....	83
6 - Potencia Instantanea (IMO, 3 <sup>er</sup> Estudio de GEI 2014).....	84
7 - Consumo Específico relativo a la carga .....	86
8 - Consumo Específico absoluto .....	86
9 - Emisiones Contaminantes .....	90
10 - Coeficiente de Ajuste para Factores de Emisión a bajas cargas .....	91
11- Consumo de Combustible por pasajero transportado.....	93
12 - Emisiones Contaminantes por pasajero trasportado.....	93
13 - Consumo de Combustible por tonelada transportada.....	95
14 - Emisiones Contaminantes por tonelada transportada.....	95
15 - Consumo de Combustible y Emisiones Contaminantes por persona y distancia navegada .....	95
16 - Consumo de Combustible y Emisiones Contaminantes por tonelada y distancia navegada .....	96

# LISTADO DE ACRÓNIMOS

	<i>Definición</i>	<i>Traducción en ingles si procede</i>
AE	Motor Auxiliar	Auxiliary Engine
AIE	Agencia Internacional de Energía	International Energy Agency (IEA)
AIS	Sistema de Identificación Automática	Automatic Identification System
BDN	Documentación de Registro de Combustible	Bunker Delivery Notes
Bottom-up	Basado en la actividad	
CH <sub>3</sub> OH	Metanol	
CO	Monóxido de Carbono	
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono	
CO <sub>2</sub> -neutro	CO <sub>2</sub> neutral, el que emite al quemarse es equivalente al que se absorbió en el proceso de producción	
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles	
DCS	Sistema de Recogida de Datos de la IMO	Data Collection System
ECA	Zonas de Control de Emisiones	Emission Control Areas
EEA	Agencia Europea del Medio Ambiente	European Environmental Agency
EEDI	Índice de Diseño de Eficiencia Energética	Energy Efficiency Design Index
EEOI	Indicador Operacional de Eficiencia Energética	Operational Energy Efficiency Indicator
EF	Factor de Emisión	Emission Factor
EGR	Recirculación de los Gases de Escape	Exhaust Gas Recirculation
EMSA	Agencia de Seguridad Marítima Europea	European Maritime Safety Agency
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos	U.S. Environmental Protection Agency
FAME	Éster Metílico de Ácidos Grasos	Fatty Acid Methyl Ester
FEDER	Fondo Europeo de Desarrollo Regional	European Regional Development Fund (ERDF)
g	Gramo, unidad de masa	
g/kWh	Gramos por kilovatios-hora	
GEI	Gases de Efecto Invernadero	Greenhouse Gases (GHG)
GLP	Gas Licuado del Petróleo	Liquefied Petroleum Gas (LPG)
GNL	Gas Natural Licuado	Liquefied Natural Gas (LNG)
h	Hora, unidad de tiempo	
H <sub>2</sub>	Hidrógeno	
HFO	Combustible Marino Pesado	Heavy Fuel Oil
HVO	Combustible de Aceite Vegetal tratado con Hidrógeno	Hydrotreated Vegetable Oil
IHSF	Proveedor de información global con sede en Londres y amplias bases de datos técnicos sobre buques, movimientos, etc.	Information Handling Services Fairplay
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático	Intergovernmental Panel on Climate Change
kg	Kilogramo, unidad de masa	
km	Kilómetro, unidad de distancia	
kn	Nudo, unidad de velocidad	Knot
kW	Kilovatio, unidad de potencia	
kWh	Kilovatio-hora, unidad de Energía	
LBG	Biogas Licuado	Liquefied biogas

LF	Factor de Carga	Load Factor
LRIT	Sistema de Identificación y Seguimiento de Largo alcance	Long-Range Identification and Tracking
m	Metro, unidad de distancia	
MARPOL	Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los Buques	
MCR	Régimen Máximo Continuo (referente a potencia)	Maximum Continuous Rating
MD	Combustible Marino Destilado	Marine Distilled
MDO	Combustible Destilado Marino	Marine Diesel Oil
ME	Motor Principal	Main Engine
MEPC	Comité de Protección del Medio Marino	Marine Environment Protection Committee
Methane Slip	Fuga de Metano sin quemar	
MGO	Gas-Oil Marino	Marine Gas-Oil
min	Minutos, unidad de tiempo	
MJ	Mega-Julio, unidad de energía	
MoS	Autopistas del Mar o Corredor Marítimo	Motorways of the Sea
MRV	Regulación europea de Monitoreo, Reporte y Verificación	Monitoring, Reporting and Verifying
MSD	Motor Diesel Marino de Velocidad Media	Medium Speed Marine Diesel
NECA	Zonas de Control de Emisiones de NO <sub>x</sub>	Nitrogen Emission Control Area
nm	Milla náutica	Nautical mile
Noon Reports	Informes de diario	
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrógeno	
°C	Grado Centígrado, unidad de temperatura	
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico	Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)
OMI	Organización Marítima Internacional	International Maritime Organization (IMO)
OMS	Organización Mundial de la Salud	World Health Organization (WHO)
OPE	Operación Paso de Estrecho	
OPS	Conexión a la red general eléctrica de los buques	Onshore Power Supply or Cold Ironing
pax	Pasajero o Persona Transportada	
PBCF	Hélice Propulsora con Aletas centrales	Propeller Boss Cap Fins
per	Persona, unidad de pasajeros transportados	
PM	Material Particulado	Particulate Matter
PM <sub>10</sub>	Material Particulado de menos de 10 micras de diámetro	
PM <sub>2,5</sub>	Material Particulado de menos de 2,5 micras de diámetro	
Power-to-Fuel	Proceso de producción de combustibles sintéticos a partir de electrólisis y CO <sub>2</sub>	
r/min	Revoluciones por minuto	
RO	Combustible Residual	Residual Oil
Ro-Pax	Buque que transporta más de 12 pasajeros y carga rodada	Passenger ship with roll-on roll-off cargo space.
Ro-Ro	Buque de carga rodada	
SASEMAR	Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima	
SCR	Reducción Catalítica Selectiva	Selective Catalytic Reduction
Scrubber	Sistema de tratamiento de lavado de los gases de escape para eliminar el azufre	

SECA	Zonas de Control de Emisiones de SO <sub>x</sub>	Sulfur Emission Control Areas
SEEMP	Plan de Gestión de Eficiencia Energética del Buque	Ship Energy Efficiency Management Plan
SFOC	Consumo Específico de Combustible	Specific Fuel Oil Consumption
Slow-Steamming	Velocidad Reducida	
SO <sub>x</sub>	Óxidos de Azufre	
SRZ	Zona de Velocidad Restringida	Speed Restriction Zones
SSD	Motor Diesel Marino Lento o de Baja Velocidad	Slow Speed Marine Diesel
SSS	Transporte Marítimo de Corta Distancia	Short Sea Shipping
STEAM	Modelo de Cálculo de Emisiones del Tráfico Marítimo	Ship Traffic Emission Assessment Model
SVO	Biofuel de Aceite Vegetal	Straight Vegetable Oil
t	Tonelada, unidad de masa	
Tank-to-Propeller	Del-Tanque-a-la-Hélice, gasto de energía desde el tanque hasta la conversión en energía cinética sobre el agua	
TEU	Unidad de carga Equivalente a un contenedor estándar de 20 pies	Twenty-foot Equivalent Unit
TIER	Niveles de emisión de NO <sub>x</sub>	
TRB	Tonelada de Registro Bruto	Gross Register Tonnage (GRT)
ULSFO	Fuel-Oil Ultra Bajo en Azufre	Ultra-Low Sulphur Fuel Oil
Well-to-Tank	Del-Pozo-al-Tanque, gasto de energía desde la extracción de la materia prima hasta su almacenaje como combustible	
Well-to-Wheel	Del-Pozo-a-la-Rueda, gasto de energía desde la extracción de la materia prima hasta la conversión en energía cinética	
WHRS	Sistemas de Recuperación de Energía Residual	Waste Heat Recovery System
ε <sub>p</sub>	Coficiente Reductor de la potencia	
μm	Micrómetro, unidad de diámetro del material particulado	



# **CAPÍTULO 1**

## INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

En la última década ha crecido de forma notable la necesidad de estudiar la manera de minimizar el impacto medioambiental producido por el sector del transporte. A nivel mundial se ha comenzado a realizar estudios donde se busca cuantificar las emisiones de contaminantes a la atmósfera y se intenta comparar la eficiencia energética de los diferentes medios de transporte. Esta tesis doctoral se centra en especial en el sector del transporte marítimo.

Respecto al transporte terrestre existe una gran cantidad de estudios publicados que permiten su análisis. Por el contrario, no hay constancia de que existan estudios sobre el coste energético y las emisiones contaminantes por pasajeros y toneladas transportadas del transporte marítimo, a pesar de que este medio de transporte está en constante aumento ya que lidera los sectores que implican líneas de comercio internacional y de larga distancia. El volumen de mercancías transportadas y el tránsito de barcos generado alcanzan cifras importantes que requieren prestar una atención especial cuando se estudia tanto el coste energético como las emisiones producidas.

Esta búsqueda de la sostenibilidad del sector en general y del transporte marítimo en particular, no pasa desapercibida por los organismos internacionales, los cuales han

marcado unos compromisos medioambientales de suma importancia con objetivos en fechas relativamente próximas.

Existen estudios realizados por U.S. Environmental Protection Agency (EPA) y la European Environment Agency (EEA) en distintas zonas de Europa y Estados Unidos utilizando varios modelos de cálculos. Estos cálculos, en base a cada modelo y zona estudiada manifiestan diferencias apreciables en sus resultados que dificultan e impiden su análisis y comparación.

No cabe duda que el transporte marítimo y la logística son de las actividades que más inciden en el comercio exterior ya que son un elemento importante en valor y coste del producto final, siendo por este motivo, un factor clave de competitividad del sector exterior, turístico e industrial español y un factor relevante en la evolución del conjunto de la balanza comercial (OTLE, 2019). Concretamente el transporte es un soporte vital tanto para la economía como para el desarrollo de las ciudades tanto en Europa como a nivel mundial. Sin embargo, es uno de los sectores de los que aportan mayor cantidad de gases de efectos invernaderos (GEI) con el agravante de un crecimiento continuo (IEA, 2009a).

Haciendo un análisis comparativo de los distintos medios de transporte desde una perspectiva exclusivamente económica se podrían extraer las siguientes conclusiones:

1. En relación a las exportaciones, el transporte por carretera es el predominante seguido del transporte marítimo, el cual ha ido aumentando en los últimos años, y a continuación de estos se situaría el sector aéreo.
2. Para el caso de las importaciones, el transporte por carretera también se considera como el de mayor peso.

Estos datos ponen de manifiesto la gran importancia del transporte por carretera, sobre todo en lo que se refiere a las exportaciones, ya que en importaciones ha ido disminuyendo su actividad a favor del sector marítimo. Aunque se podría intuir que sería lógico apostar por el transporte por carretera con vistas al futuro, no está tan claro que sea lo acertado, ya que este tipo de medio está concentrado en el mercado europeo. Por el contrario, el transporte marítimo, que como se ha dicho está ganando terreno, es dominante en destinos más alejados concretamente aquellos donde se encuentran gran parte de los mercados emergentes. Además, hay que tener en cuenta que, si se analizan

los diferentes medios en función del volumen físico a transportar, el medio predominante con diferencia es el sector marítimo ya que está especializado en cargas de mayor relación volumen/precio, lo cual resulta lógico desde el punto de vista logístico.

Los gráficos 1 y 2 muestran las diferencias entre todos los medios de transporte desde un punto de vista energético y medioambiental.

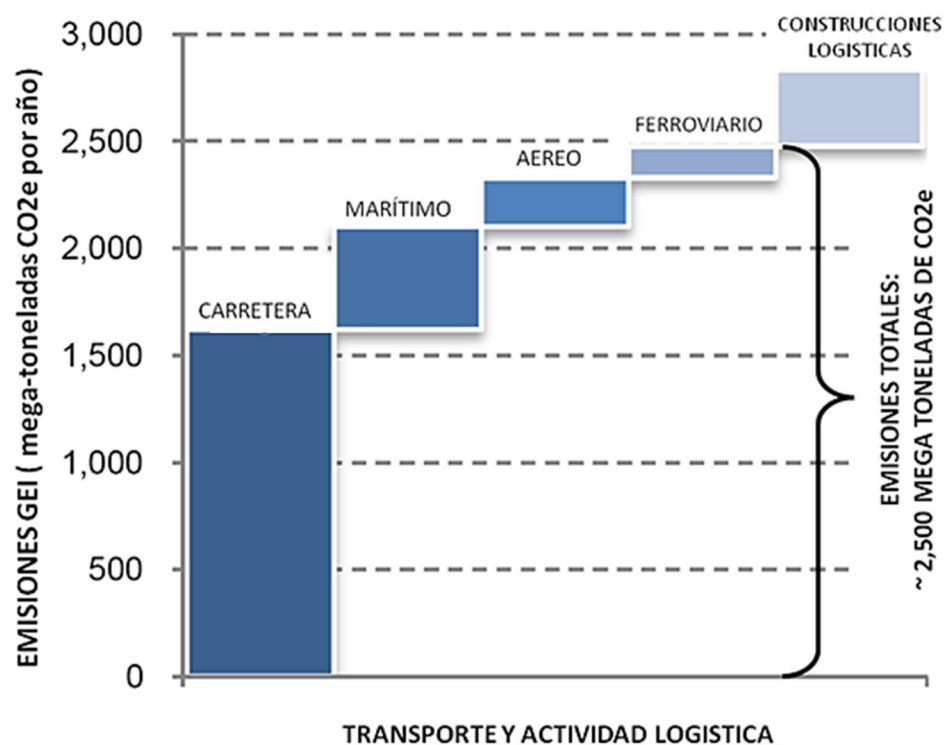


GRÁFICO 1. TRANSPORTE Y ACTIVIDAD LOGÍSTICA. FUENTE: DECARBONISING FREIGHT TRANSPORT. THE LOGISTICS CONFERENCE MILAN (MCKINNON, 2010)

El transporte aéreo también ha tenido un incremento teniendo en cuenta sólo el plano económico y es un medio significativo en el comercio exterior. En resumen, se podría decir que el transporte por carretera es fundamental para el comercio más cercano y que el transporte marítimo es de gran valor estratégico por su ventaja en los mercados emergentes y con una presencia cada vez más importante tanto a nivel de volumen como de valor económico frente al resto de alternativas.

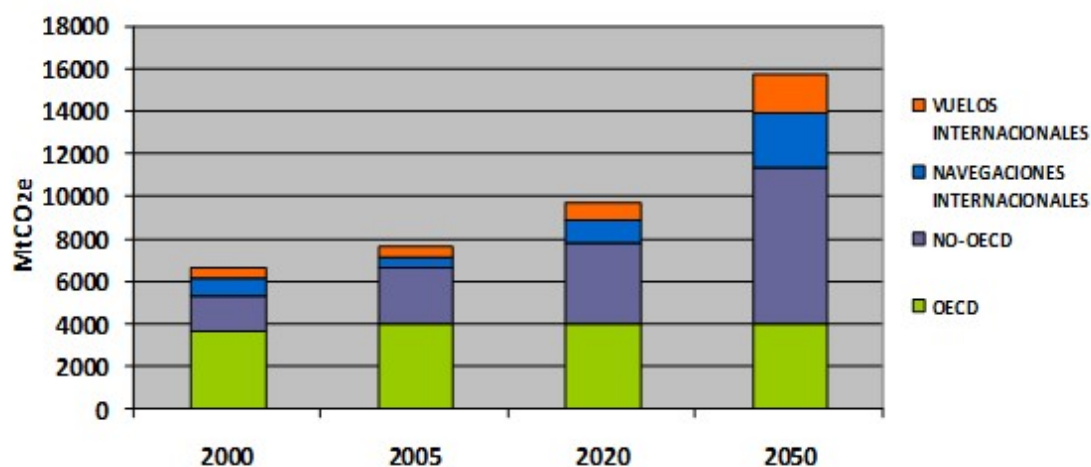


GRÁFICO 2. PREVISIONES DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> HASTA EL AÑO 2050. FUENTE: WORLD ENERGY OUTLOOK (IEA, 2009B)

A la hora de analizar la movilidad de personal y mercancías es esencial tener en cuenta los aspectos medioambientales a pesar de su complejidad y su carácter multidimensional. Así esto se recoge, por ejemplo, en el Libro Blanco del Transporte de la Comisión Europea aprobado en 2011 (Publicaciones UE, 2011), para alcanzar en el horizonte de 2050 un “sistema de transporte competitivo y sostenible” con hitos y objetivos cuantitativos concretos. En línea con el marco europeo, el Plan de Infraestructura, Transporte y Vivienda (PITVI) a nivel nacional, tras evaluar el comportamiento ambiental del sistema en los últimos años, renueva y refuerza los compromisos medioambientales. Como uno de los cinco objetivos estratégicos a largo plazo se establece “Promover una movilidad sostenible compatibilizando sus efectos económicos y sociales con el respeto al medio ambiente”. Este objetivo se desarrolla en numerosos programas de actuación transversales y de todos los modos de transporte. Y más allá constituye una consideración subyacente en la concreción de prácticamente todos ellos. El seguimiento y la evaluación de la sostenibilidad medioambiental se han visto fuertemente reforzados últimamente en consonancia con los compromisos medioambientales internacionales de España y con la creciente sensibilidad de una opinión pública más madura y sensibilidad con las cuestiones ambientales. El Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente ostenta en este terreno la principal responsabilidad, destacando el seguimiento de las emisiones realizado a través del

Sistema Español de Inventario que hace el control del grado de cumplimiento de los compromisos de España con las Naciones Unidas y con la Unión Europea.

Los impactos medioambientales del transporte, como se ha indicado, son muchos y de diferente alcance zonal (emisiones de contaminantes que contribuyen a la polución atmosférica y al cambio climático, ruido, residuos, ocupación del terreno, paisaje, intrusismo visual, biodiversidad, etc.). El cambio climático ocasionado por las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es el que impone los retos más exigentes, al menos desde la perspectiva global.

La sostenibilidad del transporte desde el punto de vista del cambio climático es una cuestión compleja que abarca numerosos aspectos relacionados entre sí: la estructura de la producción, la eficiencia energética, el uso de energías de fuentes renovables, la utilización eficiente de los transportes colectivos, etc.

En Europa, el sector del transporte en general, fue el responsable del 22% del total del GEI emitidos a la atmósfera durante el año 2005. Por otro lado, a nivel mundial, durante ese mismo año el transporte fue el responsable del 23% de las emisiones de CO<sub>2</sub> y se espera un crecimiento importante para las próximas décadas.

En el mismo año 2005 los barcos emitieron aproximadamente 1.7 millones de toneladas de SO<sub>2</sub> lo cual corresponde aproximadamente al 20% de las emisiones procedentes de las fuentes de tierra en los estados miembros de la Unión Europea (EU-27). Las emisiones de NO<sub>x</sub> (2.8 millones de toneladas) fueron el 25% de las emisiones procedentes de tierra y aproximadamente el 30% de esas emisiones ocurrieron dentro del mar territorial de los estados miembros de la Unión Europea es decir dentro de las 12 millas náuticas de costa. En las zonas económicas exclusivas (200 millas náuticas) el total de emisiones procedentes del transporte marítimo correspondió aproximadamente al 75% (Miola, et al., 2010)

El proceso de conversión de energía consumida en el transporte debería ser lo más eficiente posible porque las emisiones que producen las combustiones con bajos rendimientos, además de afectar al cambio climático, también influyen finalmente en la salud humana (Markandya & Wilkinson, 2007).

De acuerdo con estudios recientes la Organización Mundial de la Salud concluye que al menos 6 millones de muertes anuales son producidas por el tabaco. Por otro lado, 4,3 millones de muertes anuales son atribuibles a la contaminación atmosférica 4. En esta misma línea, en el año 2009, 87.000 muertes fueron atribuibles a nivel mundial al transporte marítimo como consecuencia de las partículas emitidas (WHO, 2012)

Recientemente los impactos generados por el transporte marítimo incluidos el puerto y las operaciones de carga y descarga están recibiendo mayor atención. Los Puertos en particular, son económica, social, administrativa y culturalmente organizaciones muy complejas con gran impacto social, económico y medioambiental.

La cuestión más conflictiva actualmente es cómo los barcos de crucero, los puertos y la cadena económica podrían operar de una manera eficiente dentro de un marco socialmente responsable y aceptable. Las condiciones medioambientales externas entre las que se encuentran las emisiones atmosféricas cobran una importancia particular.

Es relevante destacar los barcos de pasaje y los cruceros que ocupan hoy día un lugar prioritario a nivel internacional. Las emisiones procedentes de los puertos incluyendo barcos atracados y maquinaria portuaria, se centran fundamentalmente en SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y PM y suelen representar hasta el 50% de las emisiones locales. En el caso de los cruceros, se consideran estas emisiones como de gran volumen debido fundamentalmente a la energía que consumen en puerto sus motores auxiliares y el tiempo de estancia atracado con el agravamiento de la proximidad a la ciudad (Pallis, 2015).

Para disminuir los efectos de las emisiones, la Organización Marítima Internacional ha publicado normas de obligado cumplimiento. Así, la necesidad de controlar las emisiones ya ha llevado a marcos regulatorios restringidos al uso de opciones especiales de abastecimiento de combustible. El Anexo VI del Convenio MARPOL de la Organización Marítima Internacional coloca un límite al azufre en áreas especiales (Zonas Controladas de Emisiones-ECAs). Por ejemplo, en SECA (área controlada por emisión de azufre), en la zona del Norte y del Mar Báltico, la fracción máxima de azufre en combustible tiene que ser inferior al 1% desde 2010 y posteriormente entraría en vigor en Norteamérica en 2012. Este límite se redujo a menos del 0,1% después de 2015. El azufre mundial se limita a 3,5% en combustible con esta restricción para disminuir a 0,5% después de 2020.

Estas reglas despertaron el interés en formas alternativas de alimentar a los buques de crucero de tal manera que en los puertos de todo el mundo hay una atención especial por el uso de fuentes energía alternativas en tierra (Cold Ironing) y otras tecnologías y prácticas similares (uso de gasóleo en lugar de fuelóleo pesado, uso de fuentes de energía renovables, etc.) para reducir las emisiones.

En Europa, la directiva que gestiona el suministro de combustible ha mostrado interés por la provisión alternativa de energía en tierra. Mientras, existen otras soluciones como la disposición de gas natural licuado (GNL). Las tecnologías futuras, como la energía eólica y solar, también son opciones bajo consideración. La aplicación de medidas para reducir las emisiones, incluida la energía suministrada de tierra para los cruceros, sigue estando sujeta a variaciones regionales. Siendo más desarrollado en Norteamérica que en Europa.

En definitiva, las medidas e impactos de la sostenibilidad del transporte marítimo en relación con el cambio climático se podrían centrar en el objetivo de garantizar la movilidad y accesibilidad de personas y mercancías con bajas emisiones, o lo que sería el concepto de “movilidad sostenible”. Como primera medida se debería evitar buscar el crecimiento económico vinculado al aumento de la movilidad, o lo que sería lo mismo, reducir la movilidad sin afectar económicamente al transporte. Paralelamente, centramos en intentar reducir las emisiones a la atmósfera. Para esto se puede aumentar el consumo de energías renovables y reducir el consumo energético de los medios implicados, tanto buques como instalaciones y vehículos vinculados, llegando al punto de mejora de la eficiencia energética de los consumidores implicados y su optimización desde el punto de vista de la carga (optimizar el índice de ocupación). Sin embargo, no existen datos oficiales publicados sobre el consumo energético y las emisiones producidas por tonelada y pasajero en el transporte marítimo.

En este sentido, podría parecer relativamente fácil desarrollar un modelo de cálculo del consumo energético y emisiones producidas por pasajero, pero el buque crucero definido como una mezcla entre transporte marítimo y servicios turísticos que pagan no sólo por un itinerario de viaje sino también por otros servicios a bordo, como se ha mencionado anteriormente, conlleva otras actividades distintas a las del transporte de pasajeros que además influyen de manera directa en el consumo energético y en las emisiones producidas. En el caso de buques que transportan pasajeros además de carga,



añade la complejidad a la hora de identificar la intensidad de trabajo de transporte realizado, siendo la información de consumos y emisiones de estos buques fundamental para poder optimizar el transporte intermodal y avanzar hacia los objetivos marcados desde los organismos nacionales e internacionales.

Con el fin de conseguir un procedimiento que permita cuantificar el consumo y las emisiones producidas por buques que transporten, tanto pasajeros como carga rodada, se propone estudiar cuatro de las metodologías más relevantes aplicándolas a cada modo de navegación con el fin de proponer un modelo único para el cálculo de las emisiones producidas y la energía consumida por tonelada y pasajero transportado.

Este estudio es inédito porque cada servicio de transporte en el mar debe ser evaluado en su contexto individual, lo cual requiere un análisis cuidadoso de cada situación, cada barco y rutas específicas. Esto es necesario ya que las emisiones difieren significativamente y dependerá de otros factores como distancia navegada en cada modo, capacidad del barco, velocidad de servicio, potencia de máquinas, carga media, tipo de combustible usado y consumo de combustible.

Dada la importancia que tienen los buques que transportan tanto pasaje como carga rodada en puertos con gran cantidad de tránsitos y líneas regulares, esta investigación se ha centrado en el área del Estrecho de Gibraltar, contando con la colaboración de una de las navieras que opera en esta zona marítima. En 2018 el Ministerio de Fomento cuantificó más de 20.000 buques de pasaje de estas características realizando tránsitos entre Algeciras y otros puertos de esta zona del estrecho, representando un 2,82% respecto a 2017 y con una tendencia que aumenta año tras año.

Para la realización de las investigaciones que justifican el estudio de esta tesis se han elegido dos buques gemelos que transportan pasajeros y carga rodada, también conocidos como buques tipo Ro-Pax, que poseen similares características constructivas y que operan entre los puertos de Algeciras (España) y Tánger (Marruecos). Durante un periodo de tiempo determinado se han analizado las metodologías de estudio y los parámetros operativos de estos buques de forma que permite tener una muestra representativa de los resultados para su posterior análisis y discusión. Sobre estos análisis se fundamentan las hipótesis de partida para alcanzar los objetivos marcados, estudiando variables de suma importancia como factores de carga, velocidades reales, datos técnicos

específicos, y registros de a bordo entre otros datos operativos incluyendo consumos, pasajeros y toneladas transportadas. Estas hipótesis de partida serán desarrolladas con mayor detalle en el siguiente Capítulo 2 donde también se especifican los objetivos que se proponen para este trabajo de tesis doctoral.

## **CAPÍTULO 2**

## **CAPÍTULO 2**

### **HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

#### **HIPÓTESIS PLANTEADAS**

Este trabajo de investigación parte de los métodos que aplican tanto EPA como EEA, los cuales han sido desarrollados actualmente por separado en distintas zonas marítimas de Europa, Estados Unidos y Canadá, para poder desarrollar un modelo óptimo de cálculo de consumo energético y emisiones producidas por pasajero y tonelada transportada en el enclave marítimo del Estrecho de Gibraltar, mediante buques que transportan carga rodada y pasajeros (Ro-Pax). Las metodologías previas mencionadas, implican procedimientos y particularidades que difieren en algunos casos, con las consiguientes discrepancias cuando se intentan enfrentar resultados generales de los estudios realizados.

Al haberse aplicado estos métodos en distintas zonas de Europa y Estados Unidos, no ha existido la posibilidad de realizar un análisis comparativo cuando estos son aplicados una zona concreta diferente a la de los estudios previos. En este caso, se centra el estudio en el Estrecho de Gibraltar que al albergar tanto barcos, como condiciones del

entorno muy distintas, dificultan obtener resultados que se puedan comparar y analizar correctamente con las metodologías actuales.

La cuantificación de consumo energético y de las emisiones procedentes de los barcos en la zona de estudio no son el propósito exclusivo de este trabajo de investigación, se trata de estudiar y aplicar cada uno de los métodos anteriormente mencionados a la zona marítima del Estrecho de Gibraltar, tras un análisis comparativo de las metodologías existentes y reduciendo en todo lo posible el margen de incertidumbres, para llegar a un modelo optimizado más cercano a la realidad, de esta forma ofrece la posibilidad de ser reproducible en otros entornos objetivos de futuros estudios, siendo esta la verdadera aportación de este trabajo, que una vez concluido se podrá probar a través de las conclusiones alcanzadas.

Analizando los estudios previos realizados por organismos donde se recogen los inventarios de consumo energético y emisiones del transporte marítimo en otros países, es asumible prever que se puede lograr aplicar una metodología que reduzca el margen de incertidumbres al utilizar las consideraciones más certeras de cada estudio, pudiéndose obtener datos por pasajero y tonelada transportada que podrán analizarse junto a otros medios de transporte y otras ubicaciones geográficas.

Una primera hipótesis fue el planteamiento de por qué algunos trabajos publicados, a pesar de aplicar los métodos EPA y EEA, consideran los factores de carga de los motores principales como valores constantes, cuando se podrá demostrar que los valores que se obtienen cuando dicho factor se considera dependiente de la velocidad real instantánea del barco ofrece resultados más exactos.

Como segunda hipótesis, planteamos la pregunta de por qué algunos métodos consideran constante la relación existente entre la potencia de los motores auxiliares, encargados de la generación eléctrica a bordo, frente a la potencia de los motores principales con independencia del tipo de barco. En los estudios que se hemos realizado se demuestra que dicha relación está íntimamente relacionada con el tipo de barco objetivo de estudio, y cuando esto se tiene en cuenta, los valores que se obtienen tras dicha consideración también son mucho más exactos.

Una tercera hipótesis surge a partir de la premisa de que los valores de consumos específicos de los motores, tanto principales como auxiliares, no son constantes para todo

el rango de funcionamiento de los motores, pero sin embargo la mayoría de los autores que han realizados estudios similares no tienen en cuenta esta consideración por lo que cabría la pregunta de por qué no se analizan los cálculos de consumos específicos en función de la variación de la carga instantánea de los motores para cada modo de operación en el que se está trabajando, ya que esto afecta significativamente al resultado del consumo energético y emisiones por pasajero y tonelada.

Por otro lado, la propuesta que se plantea en esta investigación se fundamenta en la aplicación este nuevo modelo de estudio a partir de datos operacionales suministrados directamente por el propio barco sometido a estudio mediante los informes diarios de a bordo, eliminando de esta forma el margen de error asociado a la utilización de datos de actividad marítima obtenidos mediante sistemas de identificación automática (AIS), así como otros datos técnicos de los barcos a estudiar procedentes de bases de datos internacionales (Lloyd's Register – Fairplay, n.d.), que en ocasiones pueden plantear ciertas variaciones.

Tras las hipótesis planteadas anteriormente es predecible que existen diferencias notables en los resultados que se pueden obtener al aplicar las consideraciones propuestas en este trabajo de tesis doctoral frente a los estudios previos, teniendo en consideración que la propuesta de cálculo está basada en procedimientos y teorías que pueden ser probadas en el campo de la ciencia.

## **OBJETIVOS**

Tras analizar los estudios previos que cuantifican el consumo energético y las emisiones contaminantes del transporte marítimo publicados hasta la fecha, se aprecia que no existe uniformidad en los criterios a adoptar para llevar a cabo dichos estudios. Esto implica que los resultados sean difícilmente comparables y extrapolables a otros estudios.

Además, dichos resultados de consumos y emisiones no se llegan a plantear en función del producto transportado cuando se refiere al transporte marítimo, lo cual implica que sus resultados no puedan debatirse correctamente frente a otros medios de

transporte donde los datos finales se plantean en función de los pasajeros y la carga transportada.

En base a lo comentado anteriormente y la exposición de las hipótesis planteadas, se persiguen los siguientes objetivos:

1. Calcular el consumo energético de buques tipo Ro-Pax que navegan en la zona marítima del Estrecho de Gibraltar, por pasajero y tonelada transportada, mediante metodología basada en la actividad del propio barco (Bottom-up) a partir de datos operacionales de los informes diarios de a bordo.
2. Calcular las emisiones contaminantes de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  producidas por buques tipo Ro-Pax que navegan en la zona marítima del Estrecho de Gibraltar, por pasajero y tonelada transportada, mediante metodología basada en la actividad del propio barco (Bottom-up) a partir de datos operacionales de los informes diarios de a bordo.
3. Obtener un modelo para calcular el consumo energético y las emisiones contaminantes por pasajero y tonelada transportada en buques tipo Ro-Pax con el mínimo rango de incertidumbres cuando estos se desarrollan su actividad en zonas marítimas de Europa o de Estados Unidos.





## **CAPÍTULO 3**

## CAPÍTULO 3

### ANTECEDENTES

Las emisiones de dióxido de carbono producidas por el hombre son el resultado principalmente de la combustión de combustibles fósiles, motivo por el cual el consumo energético está en el centro del debate sobre el cambio climático. Estas emisiones aumentan según las predicciones de 32,3 billones de toneladas métricas en 2012 a 35,6 billones en 2020 y a 43,2 billones de toneladas en 2040 (IEA, 2016).

El transporte es el sector que posee el mayor porcentaje de consumo energético a nivel europeo, pero si atendemos al territorio nacional, además de ser el sector predominante, el porcentaje de energía consumida es mayor que el del panorama de la Unión Europea, destinándose para el transporte un 42,4% de la energía total consumida en España frente a un 33,2% en los países de la UE-28 en el año 2016. Como es consecuente, este consumo energético implica la generación de emisiones contaminantes que suelen agruparse en dos tipos en función de su foco de impacto: los Gases de Efecto Invernadero (GEI), precursores del calentamiento global, y sustancias contaminantes acidificantes, precursores del ozono troposférico y material particulado, cuya presencia

en la atmósfera tiene efectos negativos directos sobre la salud humana, los animales y la vegetación. El porcentaje de los Gases de Efecto Invernadero en el territorio nacional provocados por el sector del transporte superan también al porcentaje del mismo sector en Europa con valores de 26,3% y 30,9% correspondientemente del total de emisiones producidas por todos los sectores consumidores de energía. Desde el año 2007 hasta el 2015, las emisiones de GEI producidas en el transporte se han reducido de 107.890 a 86.203 kilotoneladas equivalentes de CO<sub>2</sub>, lo que supone un descenso del 20% según los informes anuales de transporte nacional, puntualizando que los datos del sector marítimo adolecen de falta de consistencia entre las metodologías de estimación del consumo de combustible y los datos de tránsitos realizados.

Con estos datos de consumos y emisiones es lógico prestar especial atención a la eficiencia energética, pero sin dejar atrás la eficiencia ambiental. Esta consiste en la relación entre las emisiones contaminantes y las unidades de transporte por distancia recorrida. El transporte posee un peso importante en las emisiones de GEI globales, especialmente para España por lo que se está librando una parte fundamental de la batalla contra el cambio climático, adoptando numerosas iniciativas promovidas por la Unión Europea en forma de creación de nuevas instituciones, análisis y normativa (directivas y reglamentos). A pesar de ello el sistema de transporte español presenta desafíos particulares de sostenibilidad, al menos desde la perspectiva del cambio climático y la calidad del aire los cuales se pretenden plantear en la inminente aprobación de la Ley de Cambio Climático y Transición Energética, en la que está previsto establecer unos objetivos ambiciosos de reducción de emisiones GEI, incremento de la cuota de energías renovables y de la eficiencia energética. Las emisiones de GEI siguen siendo, por tanto, las más dependientes de la intensidad del transporte, ya sean viajeros-km o mercancías-km, debido a la utilización continuada de combustibles derivados del petróleo. (OTLE, 2019)

El transporte por carretera es el predominante a nivel nacional, pero si atendemos a el transporte internacional, el marítimo es el modo con mayor representación con un crecimiento anual que se mantiene con la misma tendencia durante la última década. El transporte intermodal depende del precio relativo del transporte marítimo (€/ tonelada-km o €/ pasajero-km) en comparación con las alternativas disponibles. El transporte por carretera y ferrocarril son alternativas del transporte marítimo costero o “Short Sea

Shipping”, mientras que el transporte intercontinental de larga distancia, que representa alrededor del 80% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> del transporte marítimo en 2007 (OMI, 2009), solo puede sustituirse parcialmente por el transporte aéreo. Por ejemplo, la aviación ha reemplazado a la mayoría de los servicios de pasajeros de transatlánticos, pero para muchos productos y rutas comerciales, no hay sustituto directo para el transporte marítimo. El coste del transporte marítimo depende los fletes de los barcos, el factor de coste, la operatividad del propio barco y logística, la eficiencia del consumo de combustible de los motores y los precios de otros modos de transporte competidores. Sin embargo, el transporte marítimo es uno de los medios más eficientes de transporte de carga en términos de CO<sub>2</sub> por tonelada y kilómetro (IMO, 2009), aunque esto se debía en gran medida a ratios económicos y no al uso de tecnologías avanzadas, siendo esto algunos de los objetivos de cambios presentes en la actualidad.

Actualmente, el coste de las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte marítimo no están internalizados y, por lo tanto, no se reflejan en los precios finales del transporte. Esto coloca a otros medios de transporte en desventaja al poseer, en cierta medida, dichos costes contemplados sus precios finales, lo cual pone de manifiesto la necesidad realizar estudios al respecto.

El crecimiento del transporte marítimo internacional en el periodo 2008-2016 de un 8,5%, también ha sido experimentado por el transporte nacional o cabotaje. La apuesta por la internacionalización de la economía española para salir de la crisis, así como por la globalización de la economía y del transporte, ha aumentado la participación del transporte internacional en el total del transporte marítimo, que alcanzó en 2016 una cuota del 86%. Dentro del transporte marítimo internacional de mercancías cabe mencionar la relevancia del transporte marítimo de corta distancia conocido como “Short sea shipping” llevado a cabo con otros países de nuestro entorno, movilizando en 2016 un total de 186,7 millones de toneladas, que suponen un incremento del 4,3% con respecto a las cifras de 2015. La actividad intermodal también sigue una tendencia creciente con valores 12,5% para el transporte de contenedores en buques de carga rodada (buques tipo Ro-Ro), 8,3% de los tráficos distintos de los contenedores y 7,7% de contenedores en buques no Ro-Ro en el año 2017 según el informe anual del Observatorio del Transporte y la Logística en España. El transporte marítimo domina en todos los continentes más aún fuera de Europa: en América, África y Asia. En Europa (principal socio comercial y principal origen y

destino del transporte internacional de mercancías), el modo marítimo representa un 56% del total, lo que pone de manifiesto la importancia del transporte marítimo de corta distancia con Europa. (OTLE, 2018)

Los Estados Miembros de la Unión Europea han tenido sus reservas a la hora de desarrollar una legislación sólida para reducir las emisiones y el consumo energético por la posibilidad de que pudiera influir negativamente en sus comercios marítimos y portuarios sin alcanzar realmente el objetivo de integridad ambiental esperado. Esto justifica la necesidad de acciones para el control de GEI a nivel de la UE. Entre otros motivos, los costes de las emisiones del sector marítimo no están cuantificadas y existen barreras que impiden la implementación generalizada de medidas tecnológicas de reducción y operatividad que podrían mejorar el transporte marítimo. Las políticas adoptadas pasan por monitorear, informar y verificar las emisiones. Esto se persigue basándose en la medición del consumo de combustible para posteriormente estimar las emisiones. Para ello las propuestas pasan por cuantificar el consumo energético aproximado de los buques a partir de libros de registros, caudalímetros, documentación de registro de combustible o “Bunker Delivery Notes” (BDN), y otros métodos que siguen presentando diferencias apreciables en sus resultados finales. Por este motivo se sigue estudiando las diferentes alternativas para aplicar el método más preciso y accesible para cada caso (Hunsecker, et al., 2018).

Sin embargo, se deben realizar más estudios sobre la precisión real de los diversos métodos en la práctica, para que se puedan emitir directrices oficiales. Se necesita un análisis detallado de la precisión, coste, tiempo requerido y las posibilidades de verificación por parte de terceros antes de que se pueda hacer una recomendación concreta. Debido a la alta carga administrativa de informar las emisiones para cada viaje, se contempla la posibilidad realizar informes anuales. La verificación del consumo de combustible se puede realizar mediante varias metodologías que todavía son objeto de discusión entre los organismos especializados, pero se necesitan más estudios sobre la precisión relativa, los costes y las implicaciones de tiempo de estas opciones, y por lo tanto es difícil definir una mejor opción para este propósito (RICARDO-AEA, et al., 2013).

Complementando las iniciativas internacionales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, como el Acuerdo de París en virtud de la Convención Marco

de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, la Organización Marítima Internacional (OMI) ha conseguido una reducción considerable en cuanto a la reducción de emisiones del transporte marítimo internacional. En abril de 2018 se adoptó una estrategia inicial con miras a reducir el total de las emisiones de gases de efecto invernadero anuales en al menos un 50 % de aquí a 2050. Se han propuesto nuevos mecanismos de reducción de emisiones, que posiblemente incluirán medidas de mercado, como soluciones a medio plazo sobre las que se decidirá entre 2023 y 2030, así como posibles medidas a largo plazo que se adoptarían de 2030 en adelante. Destaca la entrada en vigor de las enmiendas al Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques MARPOL 1973/1978, que establecen la obligatoriedad del sistema de recopilación de datos sobre el consumo de fueloil de los buques con un arqueo bruto igual o superior a 5.000 toneladas, la recopilación de datos se estableció con fecha de inicio el 1 de enero de 2019. Con respecto a la contaminación atmosférica procedente de los buques, asociada a un gran número de muertes y enfermedades respiratorias, el límite mundial del 0,5 % para el contenido de azufre del fueloil utilizado a bordo de los buques entrará en vigor el 1 de enero de 2020, para el cual la OMI está preparando directrices al respecto (UNCTAD, 2018).

Atendiendo al impacto de las emisiones del transporte marítimo sobre la salud, hay estudios que afirman que dicho sector contribuye significativamente a la contaminación del aire, particularmente en las zonas costeras, estimando alrededor de entre 1,2 y 1,6 de toneladas métricas de material particulado de diámetros 10  $\mu\text{m}$  o menos ( $\text{PM}_{10}$ ), entre 4,7 y 6,5 toneladas de óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) y entre 5 y 6,9 toneladas de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) (Cofala, et al., 2007). Estudios recientes han estimado que alrededor del 15% de las emisiones globales de  $\text{NO}_x$  y del 5% al 8% de las emisiones globales de  $\text{SO}_x$  son atribuibles al transporte marítimo de larga y media distancia. Dado que casi el 70% de las emisiones de los barcos ocurren dentro de los 400 km de tierra, esto afecta directamente a las zonas costeras (Corbett, et al., 2007a).

Muchas investigaciones han vinculado la contaminación del aire con efectos negativos para la salud de las poblaciones expuestas, las concentraciones de PM se han asociado con impactos en la salud como asma, ataques cardíacos e ingresos hospitalarios (Cohen, et al., 2005).

Se estima que las emisiones de PM del transporte marítimo contribuyen con aproximadamente 60,000 muertes anualmente a escala mundial, con impactos concentrados en las regiones costeras en las principales rutas comerciales. La mayoría de los efectos de mortalidad se observan en Asia y Europa, donde coinciden las altas poblaciones y las altas concentraciones de emisiones. Algunos estudios indican que del 3% al 8% de estas mortalidades son atribuibles al transporte marítimo donde una de las incertidumbres más relevante entre otras radica en la precisión y disponibilidad de inventarios de emisiones de los barcos y sus consumos energéticos. Estas incertidumbre pueden generar resultados con mayor margen de error a escalas locales por la falta de datos de las operaciones de los buques, emisiones y otros factores necesarios para la evaluación (Corbett, et al., 2007b).

La Organización Marítima Internacional (OMI) fue establecida por los gobiernos como una agencia especializada bajo las Naciones Unidas para proporcionar el mecanismo para la cooperación intergubernamental en el campo de la regulación de los buques dedicados al comercio internacional. La OMI es responsable de la regulación global de todos los aspectos del transporte marítimo internacional y tiene un papel clave para garantizar que las vidas en el mar no estén en riesgo, incluida la seguridad del transporte marítimo, y que las operaciones de los barcos no contaminen el medio ambiente, tal como se resume en la declaración de la misión de la OMI: Navegación segura y eficiente en océanos limpios.

La OMI lleva trabajando desde 1997 para afrontar las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la adopción de medidas de eficiencia energética operativas y técnicas globales obligatorias para los buques en virtud del Anexo VI del Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los Buques (MARPOL 73/78). Para ello establecen políticas y prácticas relacionadas con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de los buques aprobadas el 5 de diciembre de 2003, instando al Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) a identificar y desarrollar los mecanismos necesarios para lograr la limitación o reducción de las emisiones de GEI del transporte marítimo.

En el Anexo VI del Convenio MARPOL, adoptado en 1997, se limitan las emisiones de los principales contaminantes atmosféricos contenidos en los gases de escape de los buques, en particular los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y los óxidos de nitrógeno

(NO<sub>x</sub>), y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono. En dicho Anexo también se regula la incineración a bordo, así como las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) procedentes de los buques tanque. Entró en vigor en 2005 pero las modificaciones y enmiendas más relevantes se realizaron en 2008 en el Código Técnico de NO<sub>x</sub> y en 2011 con un nuevo Capítulo 4 que trata sobre las regulaciones de eficiencia energética para buques, haciendo especial énfasis en las emisiones de GEI. Con el fin de reducir aún más las emisiones de contaminantes atmosféricos en las zonas sensibles se crean las zonas de control de las emisiones (ECA).

**TABLA 1. ZONAS DE CONTROL DE EMISIONES. (IMO, 2015)**

	Emisiones	En vigor a partir de
Mar Báltico	SO <sub>x</sub>	19 de mayo de 2006
Mar del Norte	SO <sub>x</sub>	22 de noviembre de 2007
Norte América	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub>	1 de agosto de 2012
Estados Unidos Mar Caribe ECA	SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub>	1 de enero de 2014

Las emisiones de óxidos de azufre están limitadas a través de la regulación del contenido de azufre en el combustible. Alternativamente, los armadores pueden optar por usar combustibles sin azufre o instalar un filtro para eliminar el SO<sub>x</sub> de los gases de escape. A partir de enero de 2015, el contenido de azufre de los combustibles utilizados en las zonas de control de las emisiones de óxidos de azufre (SECA) se redujo significativamente a un nivel que los barcos ya no pueden cumplir sin cambiar a un combustible destilado o usar gas natural licuado o una tecnología de lavado de gases de escape. Los requisitos de las SECA, que incluyen el Mar Báltico, el Mar del Norte y las costas este y oeste de América del Norte, son más estrictos que los requisitos generales que se aplican a otras aguas, el límite máximo del contenido de azufre a nivel mundial se reducirá del actual 3,5% al 0,5%, con efectos a partir del 1 de enero de 2020, condicionado a un estudio de viabilidad que habrá de presentarse a más tardar en 2018. Los límites de SO<sub>x</sub> y materia particulada se redujeron a 0,10% en las ECA a partir del 1 de enero de 2015.

Las aguas dentro de las 200 millas náuticas de las costas de América del Norte y dentro de las 50 millas náuticas de las costas de Puerto Rico y las Islas Vírgenes de los Estados Unidos han sido designadas bajo el Anexo VI de MARPOL como zonas de control especiales tanto para SO<sub>x</sub> como para NO<sub>x</sub>. El Mar del Norte y el Mar Báltico se



designan solo como SECA, aunque los países vecinos también están investigando la opción de designar también dicha zona como control de NO<sub>x</sub>.

**TABLA 2. LÍMITES DE AZUFRE PERMITIDO EN COMBUSTIBLES. (IMO, 2015)**

Contenido de azufre en Fuel	2008	2010	2012	2015	2020
SECA	1,5%	1%		0,10%	
Nivel global	4,5%		3,5%		0,5%

Las emisiones de NO<sub>x</sub> del transporte marítimo están reguladas por límites obligatorios sobre las emisiones de motores de nueva construcción, definidos de acuerdo con la velocidad de giro del motor. Los límites para estos diferentes niveles o “TIER” son tres como se muestra en siguiente tabla 3. En ella se aprecia las enmiendas que adoptó la IMO en el Anexo VI de MARPOL sobre emisiones de NO<sub>x</sub> con respecto a la fecha de implementación de los estándares de Nivel III dentro de las ECAs, estableciendo que los buques construidos a partir del 1 de enero de 2016 deben cumplir con los estándares de Nivel III de NO<sub>x</sub> cuando operen en el ECA de América del Norte o el ECA del Mar Caribe de los Estados Unidos. Esta regulación se aplicará a los buques construidos en o después de la fecha de adopción por el Comité de Protección del Medio Marino de cualquier nueva NECA o una fecha posterior como se puede especificar en la enmienda que designa el ECA de Nivel 3 de NO<sub>x</sub>. (MARPOL, Anexo VI)

**TABLA 3. NIVELES DE EMISIONES ÓXIDOS DE NITRÓGENO. (IMO, 2015)**

	Entrada en vigor	Nuevos motores instalados a partir de:	Límite NO <sub>x</sub> g/kWh	Reduc. Relativa a respecto a Tier I
Tier I	2005	Del 1 Enero 2000 al 31 Diciembre 2010	9,8 – 17,0	-
Tier II	1 de enero de 2011	Posteriores al 1 de enero de 2011	7,7 – 14,4	15 – 25%
Tier III	1 de enero de 2016	Barcos construidos después del 1 de enero de 2016 y que operan en NECAs	2,0 – 3,4	80%

En abril de 2018, el Comité de protección de medio marino de la OMI adoptó una estrategia inicial de reducción de los gases de efecto invernadero de los buques. La estrategia define una visión para reducir los gases de efecto invernadero ocasionadas por el transporte marítimo internacional y para eliminarlos tan pronto como sea posible durante este siglo, con carácter de urgencia. La estrategia inicial concibe una reducción en el total de las emisiones de gases de efecto invernadero provocados por el transporte marítimo internacional de al menos el 50% en 2050 comparado con los niveles de 2008, al mismo tiempo que se persigue eliminarlas por completo. Dicha estrategia incluye una

referencia específica a un "itinerario de reducción de emisiones de dióxido de carbono coherente con los objetivos de temperatura del Acuerdo de París".

**TABLA 4. LIMITES DE EMISIONES OXIDOS DE NITRÓGENO TIER I-III. (MARPOL ANEXO VI)**

Regulación	Límite de NO <sub>x</sub> [g/kWh]	Rango de velocidad [r/min]
Tier I	17 $45 \times n^{-0,2}$ 9,8	$n < 130$ $130 \leq n < 2000$ $n \geq 2000$
Tier II	14,4 $44 \times n^{-0,23}$ 7,7	$n < 130$ $130 \leq n < 2000$ $n \geq 2000$
Tier III	3,4 $9 \times n^{-0,2}$ 2	$n < 130$ $130 \leq n < 2000$ $n \geq 2000$

Esta estrategia realizó la inclusión de regulaciones sobre eficiencia energética para buques en el Anexo VI de MARPOL que introduce medidas técnicas obligatorias y operativas para la eficiencia energética de los buques recogidas en el Capítulo 4 de este anexo. Estas regulaciones hacen obligatorio el Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI), para nuevos buques y el Plan de Gestión de Eficiencia Energética del Buque (SEEMP) para todos los barcos en operativo. También se dieron las directrices voluntarias para el cálculo del Indicador Operacional de Eficiencia Energética (EEOI), que se desarrolló y acordó en 2009, y que podía ser usado para el monitoreo operativo de las medidas de eficiencia energética de los buques. (Talanoa Dialogue - IMO, 2018)

El EEDI ha sido desarrollado para los segmentos más grandes y con mayor consumo de energía de la flota mercante mundial y, tras la inclusión de tipos de barcos adicionales, abarcará aproximadamente el 85% de las emisiones transporte marítimo internacional. Los factores de reducción de EEDI se establecen hasta 2025 donde se requerirá que los buques construidos en dicha fecha sean al menos un 30% más eficientes energéticamente que los construidos en 2014.

El requisito de EEDI tiene como objetivo principal aumentar la eficiencia energética de los nuevos buques a medida que pase el tiempo. Es un mecanismo no prescriptivo basado en el rendimiento en términos de gramos de CO<sub>2</sub> generado por tonelada de carga transportada y milla náutica navegada, calculado para una condición operativa específica del buque de referencia. Este índice de diseño deja a la industria la elección de las tecnologías a aplicar a la hora de realizar el proyecto de un tipo de buque

específico. La intención es que, al imponer límites a este índice, la OMI podrá conducir las tecnologías actuales utilizadas en los buques a otras más eficientes a medida que se avance en el tiempo. El EEDI es un estándar técnico basado en objetivos que se aplica a buques de nueva construcción, por lo que siempre y cuando se alcance el nivel de eficiencia energética requerido, los arquitectos navales y empresas constructoras de barcos tienen la libertad de usar las soluciones más rentables para cumplir con las regulaciones. A medida que vaya pasando desde la implantación de este índice de diseño, se irá reduciendo el valor de los límites a cumplir con la intención de estimular la innovación y el desarrollo continuo de los elementos técnicos que influyen en la eficiencia energética de un barco. En febrero de 2017, más de 2200 nuevos barcos fueron certificados con los requisitos de diseño de eficiencia energética. (Bazari, 2016)

El SEEMP es una herramienta de gestión que establece un mecanismo para que los operadores mejoren la eficiencia energética de los buques existentes durante su ciclo de vida de operación de manera rentable. También proporciona un enfoque para monitorear el rendimiento de la eficiencia de la flota y el barco a lo largo del tiempo dentro de un ciclo de gestión de mejora continua. Se requiere que todos los barcos de 400 toneladas de arqueo bruto y superiores que se dediquen al comercio internacional, implementen y mantengan un SEEMP que establezca un mecanismo para que los operadores mejoren la eficiencia energética de los buques. Existen varias prácticas operacionales que se pueden desarrollar para mejorar la eficiencia energética, objetivos de mejora dentro del propio SEEMP, como mejorar la gestión técnica y operativa, la logística y planificación de flota y las medidas relacionadas con el puerto (Bazari & Longva, 2011).

La OMI también ha elaborado una propuesta de esquema para el cálculo del Indicador Operacional de Eficiencia Energética (EEOI) de forma voluntaria con el principal objetivo de usarlo como indicador de seguimiento de la actividad del transporte marítimo en relación con el SEEMP. Para el correcto desarrollo de este plan de eficiencia energética es necesario tener un seguimiento de los parámetros técnicos relacionados con el consumo energético del barco y la operatividad desarrollada, la cual se fundamenta en registros diarios del propio buque y otros sistemas de datos existentes a bordo. (Talanoa Dialogue - IMO, 2018)

Es evidente que, aparte de las razones ambientales, un elemento de peso para incentivar la eficiencia energética es el factor económico, mejorar la eficiencia energética

a menudo puede mejorar la rentabilidad operativa del buque. Las regulaciones sobre los sistemas de gestión de la eficiencia energética pueden condicionar los aumentos de velocidad para la navegación incluso cuando el precio del petróleo es bajo. La velocidad reducida es una medida operativa que con frecuencia se presenta como de mayor impacto. Dado que la necesidad de energía depende mucho de la velocidad, incluso pequeñas reducciones de velocidad pueden reducir considerablemente el consumo de energía. Dicha reducción debe ser equilibrada frente a la necesidad de entrega a tiempo, y requiere una buena planificación del viaje y transparencia entre el barco y el operador del mismo. Otra medida operativa que se podría extraer del uso de un plan de eficiencia energética, para buques con hélice de paso controlable, es ejecutar el sistema utilizando una "curva combinada" con ajustes de paso y velocidad de hélice optimizados, lo que hace posible operar el sistema de propulsión total con una eficiencia óptima. La limpieza del casco y las hélices y el uso de tratamientos antiincrustantes adecuados también es vital para proporcionar superficies lo más lisas posible, junto con la valoración de utilizar soluciones técnicas para el ahorro de energía tales como hélices tipo PBCF (Propeller Boss Cap Fins), toberas o bulbos que mejoren la eficiencia propulsiva. Además de poder gestionar el consumo de electricidad a bordo haciendo funcionar grandes consumidores en su velocidad óptima y desconectando equipos e iluminación innecesarios para contribuir al objetivo energético. A nivel del sistema, los sistemas de supervisión de la operatividad del barco son vitales para permitir el análisis de la calidad del trabajo que realiza el propio buque durante cada trayecto y hacer posible tomar las medidas que mejoren el resultado. Una mayor conciencia de la importancia de los problemas de la eficiencia energética también juega un papel fundamental, así como la formación del personal para que puedan operar todos los sistemas de la forma más optimizada. (Bännstrand, et al., 2016)

El Indicador Operacional de Eficiencia Energética (EEOI) es un elemento del marco regulatorio de la OMI que pretende actuar como un "indicador de rendimiento de eficiencia energética" durante la fase operativa del barco y se utiliza para monitorear el rendimiento general de eficiencia energética del propio buque. Las Directrices de la OMI "MEPC.1/Circ.684" proporcionan la metodología y la base para el desarrollo y los cálculos de este EEOI. De acuerdo con las directrices de la OMI, su objetivo es establecer un enfoque coherente para medir la eficiencia energética de un barco para cada viaje o

durante un determinado período de tiempo. Se espera que ayude a los armadores y operadores de buques en la evaluación del desempeño operativo de su flota, permitiendo el seguimiento de barcos individuales en operación y, por lo tanto, los resultados de cualquier cambio realizado en el barco o su actividad. De hecho, se recomienda que el EEOI se use como herramienta de monitoreo en el SEEMP como ya se ha comentado anteriormente. Este índice al igual que el EEDI, representa la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> de un barco por milla náutica de carga transportada (con una unidad de gCO<sub>2</sub>/t nm).

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{m_{carga} \times D}$$

1

En la ecuación 1 podemos observar la expresión básica para el cálculo del EEOI según la guía de aplicación de la IMO para un trayecto determinado. En la siguiente ecuación 2 se expresa cuando se calcula para una serie de trayectos, un periodo determinado o un ciclo concreto de operación, en cuyo caso lo que se obtiene es un valor promedio para el Índice de Eficiencia Energética Operacional del buque en cuestión.

$$EEOI = \frac{\sum_i \sum_j (FC_{ij} \times C_{Fj})}{\sum_i (m_{carga,i} \times D_i)}$$

2

Donde:

$j$  : Es el tipo de combustible utilizado

$i$  : Es el número de trayectos realizados

$FC_{ij}$  : Es el consumo energético en kilogramo de combustible  $j$  por trayecto  $i$

$C_{Fj}$  : Es el factor de conversión a kilogramos de CO<sub>2</sub> por combustible consumido  $j$

$m_{carga}$  : Son las toneladas de carga transportada o trabajo realizado (número de TEU o pasajeros) o tonelaje bruto en el caso de buques de pasaje

$D$  : Distancia en millas náuticas correspondientes a la distancia que se transportado la carga o durante la que se ha realizado el trabajo de transporte.

Sin embargo, en comparación con el EEDI que se define para un punto de operación de un barco, EEOI representa la emisión real de todo el CO<sub>2</sub> producto del

combustible consumido a bordo de un barco durante cada viaje, que se calcula multiplicando el consumo total de combustible para cada tipo de combustible con el factor de carbono correspondiente. El trabajo de transporte realizado se calcula multiplicando la masa real de carga (toneladas, número de TEU / automóviles o número de pasajeros) y la distancia real correspondiente en millas náuticas recorridas por el barco. Las principales fuentes de datos seleccionadas podrían ser los libros de registros del buque (libros de registro del puente, libro de registro de máquinas, libro de registro de la carga y otros registros oficiales). Es importante que se recopile información suficiente sobre el barco con respecto al tipo y cantidad de combustible, la distancia recorrida y el tipo de carga, para que se pueda generar una evaluación realista. La cantidad y el tipo de combustible utilizado (BDN u otras fuentes) y la distancia recorrida (de acuerdo con el libro de registro del barco, por ejemplo) deben ser documentados por el propio buque de manera consistente, pudiéndose automatizar el proceso si fuera posible. Cuanto más precisa y accesible sea la información, menos incertidumbres se tendrán en los resultados, motivo por el cual son necesarios estudios que continúen analizando las posibilidades. (IMO, 2016)

Actualmente se está trabajando en desarrollar regulaciones solidas que permitan dar un paso más hacia la reducción de gases de efecto invernadero. Tanto la Unión Europea como la Organización Marítima Internacional han desarrollado regulaciones para llevar a cabo la monitorización de la eficiencia energética y las emisiones contaminantes. El 1 de julio de 2015 se aprobó el EU MRV, regulación europea que enumera los requisitos para el Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV, del inglés) de las emisiones de dióxido de carbono del transporte marítimo. Esta regulación se aplica a los buques de más de 5.000 toneladas de arqueado bruto que navegan utilizando puertos de la Unión Europea para cargar o descargar, entendiéndose por carga tanto mercancías como pasajeros con fines comerciales. El trayecto a monitorear se considera de puerto de salida a puerto de llegada. Estos datos de emisiones de CO<sub>2</sub>, así como datos sobre la eficiencia energética, serían recopilados y verificados, seguidamente se envían a la base de datos central de la Agencia de Seguridad Marítima Europea (EMSA) para su tratamiento y posterior publicación por la Comisión Europea. Este plan de monitoreo requiere describir el nivel de incertidumbre asociado con los métodos de cálculo del consumo de combustible y las estimaciones de emisiones contaminantes lo cual es

complicado y motivo de debate. Los valores de referencia para poder concretar estos matices han sido discutidos y desarrollados, pero sin llegar a uniformidad de criterios. (DNV GL, 2017)

El 1 de marzo de 2018 aparece el Sistema de Recogida de Datos sobre el consumo de combustible de los barcos de la Organización Marítima Internacional (IMO DCS, del inglés) entre otras enmiendas al Anexo VI de MARPOL, donde se requiere que los buques de 5.000 toneladas de arqueo bruto y superiores recopilen datos de consumo de combustible utilizado y datos técnicos como la declaración del trabajo de transporte realizado. La metodología utilizada para recoger datos y procesos deberán aparecer descritos en el SEEMP de buque. Los datos recopilados se enviarán a la base de datos central para su posterior publicación por le MEPC. (IMO DCS, 2018)

Tanto los requisitos IMO DCS como EU MRV son obligatorios y pretenden ser el primer paso en un proceso para recopilar y analizar datos de emisiones relacionados con la industria del transporte marítimo. Entre sus principales diferencias se aprecia que no se requieren los mismos datos en ambas herramientas, mientras que IMO DCS solo especifica consumos de combustibles, EU MRV incluye además la carga transportada y las emisiones de CO<sub>2</sub>. La verificación de los datos por parte de DCS se realiza en la administración de la IMO mientras que el MRV lo hace mediante verificadores acreditados para tal fin. También difieren en el nivel de transparencia de los datos recopilados previos a los informes. Ante las dificultades para hacer efectivas estas regulaciones, las sociedades de clasificación han comenzado iniciativas para facilitar sus cumplimientos y alcanzar las metas esperadas.

Con el fin de ejecutar todas estas medidas de la manera más cercana a la realidad, cada vez es más importante la recopilación de información sobre el transporte marítimo. Los principales organismos internacionales y nacionales dedican todos los recursos a su alcance para elaborar inventarios e informes que retraten la situación actual y los periodos anteriores para retroalimentar las líneas base y puntos de referencia que marcarán el camino de las actuales y futuras normativas. El Cuarto Estudio de GEI de la OMI incluirá, entre otras cosas, un inventario de emisiones globales de emisiones de GEI del transporte marítimo internacional de 2012 a 2018, estimaciones de la intensidad de carbono de la flota mundial en el mismo período y también en 2008, que es el año que marca la línea de base para los niveles de objetivos identificados en la Estrategia Inicial, además de

plantear los diferentes posibles escenarios de futuras emisiones del transporte marítimo internacional en el período 2018-2050. Se pretende que el trabajo pueda comenzar en otoño de 2019 para la presentación del informe final del Estudio al MEPC 76 en otoño de 2020.

Estudios recientes han demostrado que a la hora de realizar inventarios de emisiones y consumos energéticos del transporte marítimo existen resultados diferentes en función de las consideraciones utilizadas en el método empleado para realizar los cálculos. Estos estudios se pueden realizar partiendo de datos globales para posteriormente analizarlos y poder estimar estadísticamente los consumos energéticos y las emisiones correspondientes. Esta práctica es conocida como “top-down” y es utilizada por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub> de bunkers internacionales en el Tercer Estudio de GEI 2014 de la OMI.

Este método asume incertidumbres que distancian los resultados de la realidad, además de errores específicos reconocidos por la Agencia Internacional de Energía (AIE) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) al estimar el consumo energético correspondiente al combustible del transporte marítimo, ya que posee errores de asignación o clasificación que involucra estadísticas de importación, exportación y búnker marino y problemas para obtener datos precisos cuando se analiza bunkers internacionales con operaciones de carga y descarga. (Smith., et al., 2015)

En el mismo estudio de la OMI se utilizaron también metodologías en las que se parte de datos específicos derivados de las propias operaciones de los buques y de bases de datos reconocidas para obtener los resultados de emisiones y consumos, es lo que se conoce como método basado-en-la-actividad o “bottom-up”. En este caso se combinaron los datos técnicos de la flota global de la base de datos marítimos IHS Fairplay, con los datos de actividad de la flota derivados de las observaciones del Sistema de Identificación Automática (AIS) para proporcionar estadísticas sobre la actividad, el uso de energía y las emisiones para todos los buques. Este enfoque eliminó las incertidumbres atribuidas al uso de valores promedio, y representó una mejora sustancial en la resolución de la actividad del tráfico marítimo, la demanda de energía y los datos de emisiones, mostrando que se pueden crear inventarios de buena precisión de las emisiones del transporte marítimo mediante el uso de análisis de calidad, enfrentando resultados de esta



metodología a informes de diario del propio buque (noon reports) y datos de Identificación y seguimiento de largo alcance (LRIT) y AIS de diferentes proveedores. Todos los estudios previos de GEI de la OMI tienen inventarios preferentemente basados-en-la-actividad (bottom-up). De acuerdo con la orientación del IPCC, las declaraciones del Taller de expertos de MEPC y el Segundo Estudio IMO GHG 2009, en este Tercer Estudio se especificó la estimación “bottom-up” más apropiada de consenso para los informes anuales de GEI y resto de contaminantes. (Smith., et al., 2015)

Estos cálculos basados en la actividad operativa de los buques siguen manteniendo ciertas incertidumbres en función del origen de los datos y la propia metodología técnica utilizada para las estimaciones. En los últimos años se han publicado diversos estudios de expertos en el campo de la contaminación del transporte marítimo y la eficiencia energética con discrepancias en sus metodologías aplicadas, las cuales han provocado que no exista uniformidad de criterios a seguir (Durán-Grados, et al., 2018).

Datos como el tiempo de duración de cada trayecto, las horas reales de funcionamiento de los motores, desviaciones derivadas de la adquisición y precisión de datos AIS o la definición del factor de carga de los motores, son algunas de las incertidumbres que varían en función de la metodología aplicada. Algunos estudios, por ejemplo, consideran constante los factores de carga para todos los tipos de buques en navegación de crucero mientras que otros, más realistas, consideran dependiente dicho factor de la potencia y la velocidad que se esté desarrollando. Así como los consumos específicos de los motores tampoco pueden considerarse iguales para todos los casos ya que sufren variaciones en función de sus fechas de fabricación y características particulares. (Moreno-Gutiérrez, et al., 2015)

Un análisis exhaustivo de las metodologías más relevantes sobre las estimaciones de emisiones contaminantes en el transporte marítimo fue realizado en la tesis doctoral de F. Calderay en 2015, donde se comparó y estudió en profundidad los modelos publicados hasta la fecha, aplicándolos a un caso de estudio concreto, y se demostró que es posible mejorar las metodologías existentes consiguiendo aumentos en la precisión de las estimaciones e inventarios de mayor calidad basados en el uso combinado de estas metodologías. (Calderay, 2015)

En base a lo comentado anteriormente, es evidente que analizar e investigar la actividad marítima es fundamental para poder trabajar en la misma línea que los organismos internacionales. Pero hay que tener consciencia de que los resultados que se obtengan dependen en gran medida de su fuente y del camino que se siga a la hora de realizar el estudio. Muchos de los factores dependen bastante de cada caso particular, incrementando el margen de error si se utilizan metodologías con parámetros constantes independientemente del tipo de buque, actividad o zona geográfica donde se desarrolle dicha navegación. Reducir la velocidad de navegación durante el trayecto de un buque, por ejemplo, puede conseguir mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones contaminantes, pero éste parámetro depende en gran medida de la configuración del motor y el tipo de propulsor que utilice, por lo que se debería tener en cuenta el rendimiento del propulsor en particular que posea el barco analizado (Durán-Grados, et al., 2018).

Esta y otras cuestiones resultan aún más complejas a la hora de realizar estudios sobre consumos y emisiones si hablamos de los buques que transportan pasaje y carga rodada simultáneamente, también conocidos como buques tipo Ro-Pax. Este segmento posee características contextuales que dificultan la generalización de resultados en los estudios debido a las diferencias que existen entre los distintos mercados geográficos en los que desarrollan su actividad, las rutas marítimas que transitan y los modos de navegación empleados (Finnsgård, et al., 2017).

Estos buques se definen como aquellos que además de disponer de cubiertas para carga rodada, pueden transportar también más de 12 pasajeros, si transportase menos de 12 pasajeros sería, por definición, un barco de carga o Ro-Ro de mercancías. Dentro de este tipo de barcos existen variaciones en función de su actividad que influyen notablemente en su comportamiento durante sus operaciones. Hay buques con capacidad para alojar pasaje y hacer trayectos con pernocta y otros que realizan rutas de menor distancia y solo operan durante el día. Esto afecta tanto a los servicios ofrecidos a bordo como camarotes, restaurantes, cafeterías, salones, etc., como a la velocidad de navegación y tamaño de los buques. Sus diseños están orientados a cubrir rutas específicas y cumplir horarios con la capacidad de corregir posibles retrasos. Debido a la gran diversidad de barcos, es muy difícil camparlos directamente entre sí, ya que no existen criterios de diseño comunes. Su carga típica suele incluir pasajeros, automóviles, camiones y otros

vehículos de carga como camiones tipo tráiler y remolques con bateas. La gran flexibilidad de la carga transportada implica múltiples requisitos para las cubiertas de carga, ya que debe compaginar grandes cantidades de carga ligera con la posibilidad de transportar vehículos pesados sin olvidar los pasajeros. (DELAMARIN, 2011)

El tamaño y la capacidad de los buques Ro-Pax varían considerablemente, con esloras que van desde los 20 m hasta más de 200 m (el barco de pasajeros Ro-Ro más grande entregado en 2010 tenía una longitud de 240 m y una capacidad total de carga rodada de 5.500 metros lineales) (Kristensen & Hagemeister, 2012).

En la Organización Marítima Internacional (OMI) ha habido un extenso debate sobre el Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI), que expresa las emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de trabajo de transporte, a la hora de aplicarlo a los buques tipo Ro-Pax. Para la mayoría de los barcos, la unidad para el EEDI se considera el gramo de CO<sub>2</sub> por tonelada de peso muerto por milla náutica. En principio se intentó asignar también esta misma unidad a los buques de carga rodada y pasaje, sin embargo, esto condujo a una gran dispersión en los datos estadísticos del EEDI. Una de las razones de esta dispersión es la gran diversidad de diseño de buques de pasajeros Ro-Ro. Algunos de los barcos transportan relativamente pocos pasajeros y mucha carga, como camiones, lo que resulta en un peso muerto relativamente alto, mientras que otros buques Ro-Pax transportan mayormente pasajeros y se centran más en el servicio y la diversión para el pasaje. Tal concepto lleva a grandes espacios de pasajeros (cafeterías, restaurantes y alojamientos) que requieren grandes barcos con un peso muerto relativamente bajo. En ambos casos se necesita una gran cantidad de volumen, que en general es proporcional al tonelaje bruto de registro del barco. Por lo tanto, la OMI ha sugerido tener en cuenta estas particularidades de este segmento de buques y que en el procedimiento de cálculo de EEDI para buques Ro-Pax se utilice las toneladas de registro bruto (TRB) en lugar de las toneladas de peso muerto, quedando definida la unidad del EEDI para este tipo de buques en gramos de CO<sub>2</sub>/GT-milla náutica. (DELAMARIN, 2011)

“Las incertidumbres en el uso de las toneladas de registro bruto para embarcaciones de pasajeros pueden compensarse utilizando un factor de corrección que tenga en cuenta el número de pasajeros, los metros lineales de carga y otras peculiaridades para embarcaciones de pasajeros y Ro-Pax; y los buques Ro-Pax a menudo tienen un diseño

complejo y actúan como enlace en las cadenas de transporte que compiten con los modos de transporte terrestres”. MEPC 59/4/2, 8 de abril de 2009

Cuando se pretende estimar las emisiones en función de los diferentes tipos de carga transportada por los buques tipo Ro-Pax, es común relacionarlas por el volumen ocupado. Como la demanda de energía es proporcional al peso total (desplazamiento) del barco, el método es racional desde el punto de vista del diseño del barco y del punto de vista hidrodinámico. Los cálculos muestran que el peso promedio (peso del barco más el peso de la carga) por volumen está más o menos en el mismo nivel para los diferentes segmentos de carga, lo que significa que el método de asignación volumétrica también es un método de asignación basado en el peso. Por lo tanto, el método se justifica ya que la demanda de energía de un buque de pasajeros Ro-Ro es proporcional al desplazamiento del buque, aunque la referencia más exacta es el peso propio de la carga transportada. Debido a la diversidad de buques de pasajeros Ro-Ro, es difícil encontrar cifras precisas para las emisiones de gases de escape y la demanda de energía por unidad trabajo realizado de transporte. Especialmente, para los buques de menor tamaño, debido a la enorme diversidad existente. Sin embargo, el cálculo de la demanda de energía por tonelada de carga y por distancia navegada, muestra que la demanda de energía varía de unos buques a otros en función de la carga predominante. (Kristensen & Hagemeister, 2012).

La percepción general de que el transporte marítimo es más eficiente energéticamente que otros medios de transporte es algo que se ha investigado y cuestionado a lo largo de los años. La mayor dificultad se suele encontrar a la hora de poder obtener datos del sector marítimo en los mismos términos en los que se realizan los estudios de los medios de transporte terrestre o aéreo. Cuando se requiere hacer este tipo de estudios, el valor total de emisiones o de consumos no suele ser representativo pudiendo llevar a resultados que distorsionen la realidad. La opción más ilustrativa es hablar de intensidad de emisiones o de consumo representando los datos obtenidos por carga transportada y por distancia recorrida. Las distancias recorridas y las velocidades a la que las recorren cada medio de transporte son muy diferentes, así como los factores de ocupación que posee cada medio en sí. Herramientas que permitan realizar estas cuantificaciones aplicadas a un plan o programa e incorporadas a la evaluación ambiental

de un proyecto, permiten optar por los modos de transporte más sostenibles y eficientes energéticamente (Crespo, 2018).

Estudios como el realizado por Hjelle (2010) cuestionan claramente que existan ventajas por utilizar el transporte marítimo frente a otras alternativas basado principalmente en que el factor de carga de los buques Ro-Pax difiere del de otros segmentos que obtienen valores de intensidad de emisiones y de consumos más ventajosos. El estudio se realizó analizando diferentes alternativas para cubrir una ruta en el norte de Europa que implicaba el uso intermodal de diferentes medios de transporte. Es evidente que la ubicación geográfica y el tipo de transporte que se utilice influye sensiblemente en las emisiones y los consumos de las diferentes alternativas. Entre sus conclusiones, se considera que el transporte mediante buques tipo Ro-Pax podría ser una alternativa de transporte más ecológica utilizando tecnologías de reducción de NO<sub>x</sub> y combustibles con bajo contenido de azufre, una velocidad operativa optimizada y un alto volumen de carga (Hjelle, 2010).

Estos estudios y cuestiones requieren un análisis muy cuidadoso para cada situación debido a que el impacto de las emisiones del transporte marítimo y los trayectos donde se realizan varían considerablemente dependiendo de cada caso concreto, dependiendo de la distancia de la ruta, la capacidad del buque, la velocidad de servicio, la potencia del motor y su factor de carga, el tipo de combustible utilizado y su consumo específico (Sjödin, et al., 2007).

Otros estudios realizados en zonas vecinas analizando las emisiones y los consumos de los diferentes medios por pasajero y carga transportada han obtenido resultados dispares dejando constancia de que el debate sobre el medio de transporte más eficiente involucrando a los buques tipo Ro-Pax frente al transporte de pasajeros y mercancías mediante carretera, tren o avión, no es fácil de realizar, y cada situación analizada puede llegar a conclusiones particulares que no pueden extrapolarse ni generalizarse (Baird & Pedersen, 2013).

Los buques Ro-Ro representan una de las principales categorías del mercado de transporte marítimo de corta distancia o short-sea-shipping, y posee las tecnologías más innovadoras, a partir de las cuales se pueden determinar de forma efectiva las operaciones más competitivas de este tipo de navegación de corta distancia como son el manejo de la

carga, que implica bajos costos de transbordo, y la rapidez para realizar las operaciones de carga y descarga. Muchos estudios realizados no pudieron ponerse de acuerdo sobre las variables exactas que podrían generalizarse como los principales factores determinantes para garantizar que las navegaciones short-sea-shipping sean exitosas en todas partes del mundo. En Europa se ha apostado por el transporte marítimo de corta distancia porque se consideraba un modo de transporte que podía ofrecer una perspectiva realista de un cambio modal sustancial de las carreteras congestionadas y reducir el impacto medioambiental. En otros países se utiliza la experiencia y los resultados obtenidos por estos estudios para orientar las perspectivas de transporte marítimo (Arof, 2015).

Otro reciente estudio en el norte de Europa realizado por Christodoulou et al. (2019) se centra en analizar varios segmentos marítimos por separado e investigar su potencial para formar parte en cadenas de transporte intermodal y alcanzar operaciones de transporte sostenible. La intención fue investigar la forma de integrar el transporte marítimo, particularmente los buques Ro-Pax dentro de redes de transporte multimodales y destacar los posibles beneficios de dicha integración. También se puntualiza que un alto volumen de carga y de pasajeros transportados implica menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de transporte, lo cual se puede favorecer a través de una mejor planificación del viaje. Esto es coincidente con la implementación del Plan de Gestión de Eficiencia Energética del Barco (SEEMP) el cual debe brindar orientación sobre la forma en que las embarcaciones podrían optimizar su rendimiento de eficiencia operativa a través de detalles técnicos, que incluyen una planificación mejorada del viaje, la llegada justo a tiempo de las embarcaciones a los puertos y la optimización de la velocidad (MEPC 58 / INF.7 2008). (Christodoulou, et al., 2019)

El panorama nacional español fue objeto de otro estudio realizado por López-Navarro (2014) donde se destacaban algunas de las ventajas del uso de los buques tipo Ro-Pax mediante el estudio del Corredor del Mediterráneo, el Corredor Central y el Corredor del Atlántico. La comparativa entre los diferentes medios de transporte fue desarrollada a través del programa Marco Polo de la Comisión Europea el cual ofrece una estimación de coeficientes de costos externos para subcategorías de modos de transporte específicos basados en tecnología de combustible, velocidad de crucero, tamaño del vehículo y tipo de carga. En el estudio se comprobaron otras metodologías de cálculo,

utilizando diferentes valores con respecto a los costos ambientales por tonelada y kilómetro asociados a cada modo de transporte, llegando a la conclusión de que tanto los investigadores, como los responsables de la toma de decisiones, necesitan referencias claras sobre los costes ambientales de cada medio de transporte y, en este sentido, se requieren mayores esfuerzos para remediar las deficiencias existentes. Los valores de los costes ambientales podrían haberse concretado más considerando una serie de características específicas para cada medio de transporte, y en el caso del marítimo, características más allá de los datos básicos del barco, como por ejemplo todo lo referente a la potencia del motor. Las evaluaciones cuantitativas precisas requieren mucha más información como los factores de carga del barco y de las unidades cargadas entre otros datos. El segmento de buques Ro-Pax cumple con el desafío de asignar emisiones y consumo de energía a pasajeros, automóviles y camiones transportados, aunque se debe tener en cuenta la estacionalidad del tráfico de pasajeros o que la línea podría ser operada por barcos diferentes. Para ello se pueden utilizar distintas técnicas de asignación por lo que los resultados pueden diferir. Este proceso de mayor precisión podría ser factible en estudios que analicen una línea de navegación específica en profundidad, pero no en estudios como el que se realizó cuyo objetivo fue proporcionar una imagen más general de los diferentes MoS (Motorways of the Sea) en el contexto español. (López-Navarro, 2014)

En Europa, los ferris de pasajeros se concentran en tres regiones que representan una parte importante del tráfico mundial, como son las regiones del Báltico, el Mar del Norte y el Mediterráneo. La región del Mediterráneo muestra la mayor proporción de volumen de pasajeros, mientras que la región del Báltico es la región con mayor volumen de transporte de vehículos, es decir, automóviles, autobuses, camiones y remolques.

La flota con mayor número de buques es la de la región mediterránea que supera a las otras dos regiones en términos de capacidad de barcos, tonelaje de arqueo bruto, camarotes de pasaje y vehículos ligeros. Por otro lado, es la flota es más antigua, los ferries mediterráneos tienen en promedio 22 años, mientras que los de las regiones del Mar Báltico y del Mar del Norte tienen 16 y 14 años, respectivamente. (Martino & Brambilla, 2016)

La OMI destaca que los puertos y zonas colindantes son los más afectados por la contaminación del aire derivada del transporte marítimo. El Estrecho de Gibraltar es un

estrecho natural que une el Océano Atlántico con el Mar Mediterráneo, además de ejercer como frontera política entre España y Marruecos separando los continentes de Europa y África. Posee una longitud de aproximadamente 40 km con una distancia entre ambos continentes que oscila entre unos 29 km y los 13 de la zona más cercana. Por esta zona marítima transitan buques que hacen escalas intermedias dentro de sus trayectos tanto nacionales como internacionales y buques que realizan rutas regulares dentro de próximos. Un peso considerable tiene los buques que realizan la ruta que une España con Marruecos, en concreto este estudio se va a centrar en buques que navegan entre en el Puerto de Algeciras y el Puerto de Tánger (Moreno-Gutiérrez, et al., 2012). Ya en 2007 la Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima (SASEMAR) databa en más de 92.406 los barcos que transitaban por estas aguas, en 2013 la cifra aumentaba a unos 109.395 con un promedio de 300 buques por día o 12 buques cada hora. En 2018 se contabilizaron unos 125.428 tránsitos en el Estrecho de Gibraltar.

Desde los puertos existen algunas consideraciones que pueden contribuir a mejorar la eficiencia energética puerto-barco. Lo primero que se recomienda desde la propia Organización Marítima Internacional es identificar e inventariar las fuentes de emisión más importantes en las zonas de puerto y proximidades. Posteriormente se recomienda el análisis de la viabilidad y rentabilidad de posibles medidas y estrategias que favorezcan la eficiencia energética y la consecuente reducción de emisiones contaminantes. Para que esto sea realista es necesario también que se estudie la colaboración entre el puerto y los buques creando la infraestructura necesaria asociada con las medidas que se persigan adoptar, desarrollando incentivos voluntarios o financieros de acuerdo con las partes involucradas. Pero para poder evaluar que todos los esfuerzos avanzan en la dirección correcta, es necesario conseguir monitorear las medidas adoptadas y buscar la optimización de las mismas. Por este motivo estudiar la posibilidad de obtener datos precisos sobre la actividad de los buques basados en su operativa es una herramienta de gran utilidad. (IMO, 2015)



## **CAPÍTULO 4**

## CAPÍTULO 4

### METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología aplicada para realizar los cálculos de consumo energético y emisiones contaminantes por pasajero y tonelada transportada mediante el estudio de buques tipo Ro-Pax que navegan por el Estrecho de Gibraltar realizando la ruta marítima que comunica los puertos de Algeciras (España) y el puerto de Tánger (Marruecos).

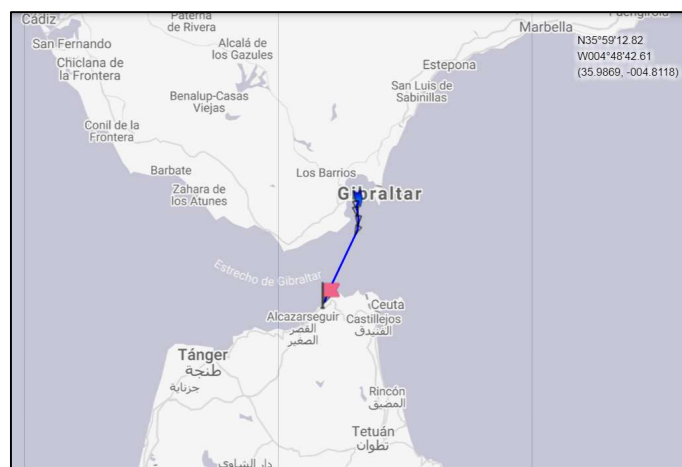


ILUSTRACIÓN 1. ESTRECHO DE GIBRALTAR, RUTA MARÍTIMA ALGECIRAS - TÁNGER

Para ello se ha realizado un estudio de varios métodos de estimación basados en la actividad del propio barco, metodología bottom-up, para optar por un modelo que minimice el rango de incertidumbre, ofreciendo la oportunidad de realizar una mejor gestión de la energía y con la posibilidad de aplicarse a cualquier tipo de barco. En este estudio se calcula el consumo de combustible y las emisiones de GEI producidos de un ferris tipo Ro-Pax mientras realiza la ruta del Puerto de Algeciras (España) al Puerto de Tánger (Marruecos) durante dos meses de 2017. Se fundamenta en la aplicación de cuatro métodos diferentes (EPA, 2000; Smith et al., 2014; MAN Diesel & Turbo, 2012 and Jalkanen et al., 2009) para obtener la propuesta de un nuevo modelo basado en los anteriores pero mejorado. Del trabajo de investigación llevado a cabo durante el estudio de esta tesis doctoral se ha desarrollado un modelo que ha sido publicado en un artículo científico de una revista de alto índice de impacto internacional donde se puede apreciar el análisis completo de las metodologías existentes y como se llega un modelo optimizado el cual se aplica al presente estudio para alcanzar los objetivos marcados (Este artículo se puede consultar para más detalles en el Anexo I de esta tesis doctoral). (Moreno-Gutiérrez, et al., 2019)

**TABLA 5. COMPARATIVA ENTRE LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS ESTUDIADAS PARA OBTENER EL MODELO UTILIZADO. (MORENO-GUTIÉRREZ, ET AL., 2019)**

COMPARATIVA ENTRE LAS METODOLOGIAS ESTUDIADAS				
	Potencia desarrollada	SFOC	Factores de Emisión	Relación Velocidad y Potencia, “n”
<b>EPA</b>	$P_{tráns.} = P_1 \left( \frac{V_{trán.}}{V_1} \right)^n$	Constante en función del tipo de motor	ARB, ENTEC (2002)	Constante, n=3
<b>IMO</b>	$P_{trán.} = \frac{P_1 \left( \frac{t_{trán.}}{t_1} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{V_{trán.}}{V_1} \right)^n}{\eta_w \eta_f}$	Depende del tipo de motor y la carga de trabajo	IMO	Constante, n=3
<b>Jalkanen</b>	$P_{trán.} = \varepsilon p \cdot P_{ins.} \left( \frac{V_{trán.}}{V_{diseño} + V_{seguridad}} \right)^n$	Depende del tipo de motor y la carga de trabajo	ENTEC (2002)	Constante, n=3
<b>MAN</b>	$P_{tráns.} = P_1 \left( \frac{V_{trán.}}{V_1} \right)^n$	Constante en función del tipo de motor	NA	Depende del tipo de buque

Este modelo se fundamenta en parámetros y características propias del barco objetivo de estudio tales como tipo y tamaño del buque, tipo de motor, combustible utilizado en cada etapa del trayecto, potencia total instalada y potencia al 100% MCR (Maximum Continuous Rating) tanto de motores principales como auxiliares, junto con

datos de las navegaciones que se realizan, la carga transportada y pasajeros embarcados, más los datos correspondientes de consumo de combustible y factores de emisión.

Una de las notables ventajas de este modelo es la utilización de los datos propios del buque extraídos directamente de sus informes de datos diarios de a bordo o Noon Reports. Estos son informes llevados a cabo por los oficiales de máquinas diariamente donde se recogen los parámetros más relevantes de los sistemas principales de la cámara de máquinas del buque. También se recopilan datos de registros diarios de la sección de puente y de cubierta. Muchos de estos datos que se han obtenido de la operativa del buque forman parte del propio SEEM, el cual también ha sido estudiado y analizado.

Esta opción de aplicar datos del propio barco para poder conseguir los resultados elimina la necesidad de utilizar datos de Sistemas de Identificación Automática (AIS de su definición en inglés) con el consiguiente beneficio en la precisión de los resultados. Esto puede apreciarse de forma resumida en la siguiente tabla 6 donde se recogen las diferencias que obtenemos al utilizar la metodología propuesta basada en datos del propio buque.

TABLA 6. COMPARACIÓN ENTRE INCERTIDUMBRES DE SISTEMA AIS Y MÉTODO DE ESTUDIO.

Incertidumbres, extraídas del Tercer Estudio GEI de la IMO, 2014	Modelo propuesto para el estudio
Las incertidumbres, particularmente de los datos AIS, surgen de la estimación del número de buques activos o de los trayectos realizados del total de navegaciones nacionales e internacionales.	Al no usarse datos provenientes de AIS, este modelo elimina la posibilidad de producir alguna incertidumbre al respecto.
Cuando no existe algún dato AIS, los valores se estiman a partir de interpolación o mediante referencia a otra fuente de datos pública disponible.	En el modelo propuesto no faltan datos que haya que obtener de otra fuente.
Muchos barcos no aparecen en bases de datos como IHSF y tampoco se tiene datos de su actividad. El tráfico nacional de buques aparece en las emisiones, pero con gran incertidumbre al no tener datos de características técnicas.	Es problema no tiene lugar en el modelo de estudio al trabajar con datos obtenidos de a bordo de los propios buques que se están estudiando.
En el modelo basado en AIS no se contemplan las condiciones climatológicas. El consumo de combustible y las emisiones se pueden duplicar o triplicar fácilmente en condiciones de fuerte viento o mala mar.	Se cuenta con los datos del propio barco sobre las condiciones climáticas, estado del casco y de la hélice.
Dentro del Plan de Monitoreo de Combustible, se asume un 10% de incertidumbre en los resultados por los procesos de sondear manualmente.	Este proceso no se aplica en el modelo propuesto.

Las principales fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera en un barco son los motores principales (MMEE), los motores auxiliares (AAEE) y las calderas térmicas. Las más relevantes son las emisiones producidas por los motores de combustión, las emisiones de las calderas son las de menor repercusión y dependen en gran medida de su tamaño y de la intensidad de su uso. En buques portacontenedores las calderas son usadas para sistemas auxiliares de la carga transportada, mientras que, en los

buques petroleros, las calderas son fundamentales para poder realizar las operaciones de carga y descarga. En los buques tipo Ro-Pax utilizados para el estudio no se utilizan grandes calderas térmicas, por lo que solo se analizarán consumos de energía y emisiones contaminantes procedentes de motores principales y motores auxiliares.

La metodología bottom-up que se utiliza en el estudio tiene en cuenta la potencia desarrollada y los factores de carga correspondiente a cada modo de operación que realice el barco (navegación, maniobras, velocidad reducida, atraque y desatraque, más adelante se describen cada uno de ellos con más detalle), estudiado en cada trayecto tanto motores principales como motores auxiliares para poder obtener el consumo energético y las emisiones producidas de dicha actividad en función de la carga transportada en cada viaje realizado.

Se han estudiado todos los trayectos realizados por dos buques Ro-Pax gemelos durante un periodo de siete meses, desde enero de 2018 hasta julio del mismo año, recopilando información de dichos buques correspondientes a 1.668 trayectos del buque A y 1.425 trayectos del buque B, sumando un total de más de 3.000 tránsitos analizados.

Este volumen de datos es el resultado de haber filtrado y depurado la información obtenida debido a que, al manejar partes reales recopilados por los propios buques, existe la necesidad de eliminar un pequeño porcentaje de datos incoherentes o erróneos derivados de la exportación de los datos o del factor humano a la hora de registrarlos, para poder trabajar con ellos y obtener los resultados más precisos posibles.

Dichos datos de la operatividad de estos barcos han sido suministrados por los propios buques extraídos del SEEMP de a bordo junto con datos de informes diarios del departamento de puente y de máquinas de cada buque, que completan información del trayecto desarrollado y la carga transportada en cada viaje para poder completar el análisis de intensidad de emisiones y consumo energético.

Como se ha comentado anteriormente, el modelo a utilizar para el cálculo de emisiones contaminantes y consumo energético es el resultado de haber analizado cuatro métodos diferentes de los más relevantes en la actualidad (EPA 2000; Smith et al., 2014; MAN 2012 y Jalkanen et al., 2009). A partir de estas metodologías se ha optado por utilizar un modelo que combina los cuatro anteriores reduciendo las incertidumbres y con la posibilidad de aplicarlo a cualquier tipo de buque. Para llegar a él se aplicaron las cuatro

metodologías a uno de los buques Ro-Pax de estudio y se analizaron los trayectos realizados durante su operativa habitual donde se tuvieron en cuenta cada modo de navegación y todos los datos necesarios para cuantificar los consumos y las emisiones.

Tras la comparativa de las metodologías se ha elaborado una propuesta con un método optimizado basado en los anteriores que proporciona un resultado más preciso y que brinda la posibilidad de calcular la energía consumida y las emisiones producidas por tonelada de carga transportada y por pasajero embarcado, además de poder expresarlo en función de la distancia, dando también dichos resultados por milla náutica navegada.

Estos datos son fundamentales si se quiere poder comparar los resultados con otros medios de transporte independientemente de la zona marítima donde se desarrolla la actividad, o si se pretende realizar una valoración del trabajo realizado durante la operatividad del buque teniendo en cuenta la intensidad de trabajo realizado, lo cual en el caso de los buques tipo Ro-Pax es complejo de realizar y no hay precedentes de otros estudios similares.

En la tabla 7 y 8 se puede apreciar la comparativa de consumos obtenidos de las metodologías analizadas, tanto de los motores principales como de los motores auxiliares respectivamente, donde se observa que, en función de las variables utilizadas a la hora de elegir un modelo para estimar los kilogramos de combustible consumido, se obtienen datos diferentes que afectan notablemente a los resultados de los inventarios y estudios que se realicen posteriormente.

**TABLA 7. COMPARATIVA DE CONSUMOS DE MMPP ENTRE LAS METODOLOGÍAS ESTUDIADAS Y LA PROPUESTA DE MODELO**

FASE DE NAVEGACIÓN	Consumo Energético MMPP [kg de combustible]				
	IMO	EPA	MAN	Jalkanen	Método Propuesto
DESATRAQUE	9,25	7,38	7,38	9,25	9,25
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	114	103,38	70,78	116,42	114
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	95,068	92,834	73,38	116,44	93,08
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	1297	1370,5	1267	1309,1	1269,9
ATRAQUE	7,58	6	6	7,58	7,58
Totales:	1522,898	1580,094	1424,54	1558,79	1493,81

**TABLA 8. COMPARATIVA DE CONSUMOS DE MMAA ENTRE LAS METODOLOGÍAS ESTUDIADAS Y LA PROPUESTA DE MODELO**

FASE DE NAVEGACIÓN	Consumo Energético MMAA [kg de combustible]					
	FUEL	IMO	EPA	MAN	Jalkanen	Modelo Propuesto
DESATRAQUE	MDO	10,32	9,8	9,8	10,32	10,32
	RO	10,47	9,94	9,94	10,47	10,47
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	MDO	54,7	51,96	51,96	54,7	54,7
	RO	55,48	52,7	52,7	55,48	55,6
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	RO	12,6	10,64	10,64	12,6	12,6
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	RO	96,85	81,82	81,82	96,85	96,85
ATRAQUE	MDO	10,59	10,06	10,06	10,59	10,59
	RO	10,74	10,2	10,2	10,74	10,74
CARGA/DESCARGA	MDO	131,25	131,25	131,25	131,25	131,25
Totales:		393	368,37	368,37	393	393,12

Como se puede observar en las tablas anteriores, los resultados de modelo propuesto que se aplicará en este estudio están más próximos a los métodos utilizados por IMO que los desarrollados por MAN Diesel & Turbo (2012). Todo apunta a que la influencia de la eficiencia del sistema propulsor y el desplazamiento del buque durante la navegación tienen mayor importancia en los resultados que el valor del exponente que relaciona la potencia y la velocidad. Estas consideraciones junto con la adaptación del exponente en la propuesta de Smith et al. (2014) en función del tipo de barco a estudiar (en nuestro caso al tratarse de un buque tipo Ro-Pax tendrá el valor de 3,5), como propone MAN Diesel & Turbo (2012), demuestran que tras su aplicación se puede observar que para mismas velocidades desarrolladas por los motores propulsores, existen diferentes valores de factores de carga y potencia generada ya que dependen del calado, las condiciones climáticas y la resistencia opuesta por el buque al desplazamiento como resultado del ensuciamiento del casco y la hélice (fouling). (Moreno-Gutiérrez, et al., 2019)



TABLA 9. COMPARATIVA DE EMISIONES TOTALES ENTRE LOS DIFERENTES MÉTODOS ANALIZADOS

METODOLOGÍAS	EMISIONES CONTAMINANTES TOTALES [kg]					
	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
IMO	6187,02	13,748	98,662	176,545	14,093	13,808
EPA	6237,47	13,594	99,105	176,97	14,134	13,775
MAN	5782,72	12,736	91,685	164,39	13,243	12,829
Jalkanen	5915,22	13,122	93,935	168,355	13,536	13,158
Método Propuesto	5872,42	13,028	93,142	167,025	13,315	13,048

Tras haber estudiado los cuatro métodos analizados para la elaboración del modelo optimizado, se puede apreciar que el rango de variación entre cada uno de ellos respecto a las emisiones contaminantes producidas por los motores y los consumos totales de energía correspondientes, oscila entre un 9% y un 10%. El prescindir de la utilización de base de datos AIS y la reducción de variables consideradas como constantes, tales como consumos específicos, carga de los motores o factores de emisión, consigue que el modelo desarrollado y propuesto para el estudio de este trabajo de tesis doctoral reduzca sensiblemente las incertidumbres y permita su aplicación cualquier tipo de buque.

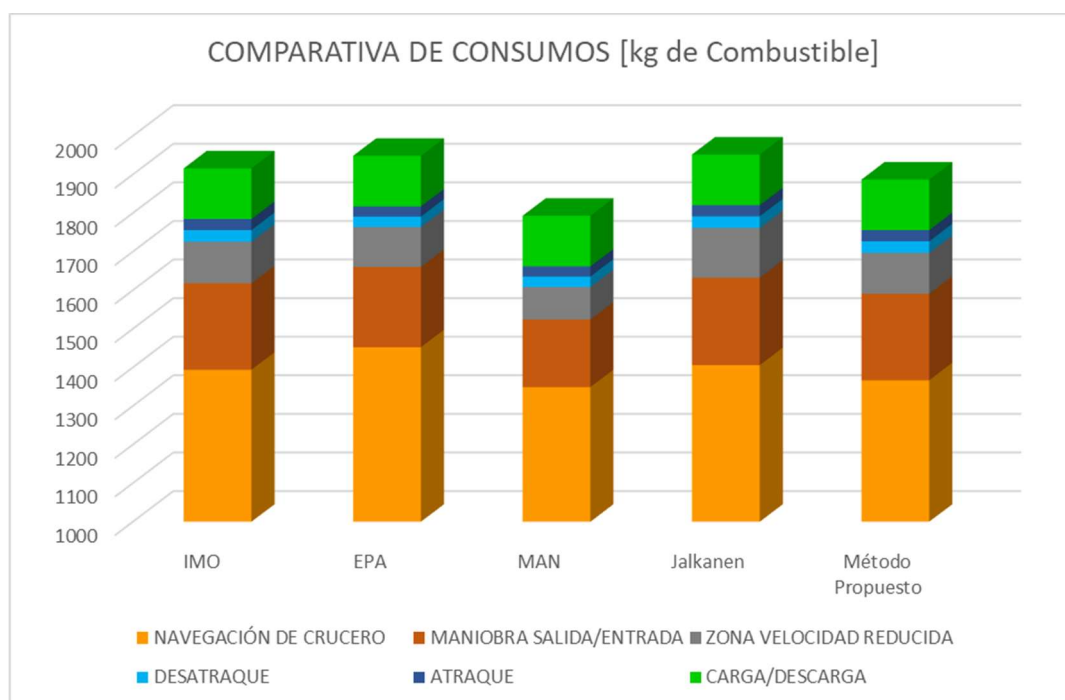


GRÁFICO 3. COMPARATIVA DE CONSUMOS TOTALES DE MMPP Y MMAA ENTRE LAS DIFERENTE METODOLOGÍAS ESTUDIADAS

Para aplicar la metodología propuesta y obtener los resultados de consumos y emisiones por pasajero transportado y tonelada de carga, se parte de información real de a bordo. Los parámetros principales, extraídos de las bases de datos de los propios buques y de los informes diarios de a bordo (Noon Reports), son los siguientes:

- Velocidad Actual de navegación para cada etapa del trayecto [kn]
- Máxima Velocidad de Diseño al 100% MCR: 19,2 nudos
- Máximo Calado para la condición de máxima carga: 5.570 m
- Calado Actual para cada trayecto [m]
- Distancia navegada por viaje [nm]
- Consumo Específico de Combustible (SFOC) base o de referencia dependiendo de la etapa del viaje que se esté realizando:
  - 0,213 g/kWh para Combustible Residual (RO)
  - 0,210 g/kWh para Combustible Destilado (MDO)
- Velocidad Sobre el Fondo para cada etapa del viaje [kn]
- Velocidad Sobre el Agua para cada etapa del viaje [kn]
- Potencia Total Instalada:
  - Motores Principales:  $2 \times 5.850$  kW (100% MCR)
  - Motores Auxiliares: 2.500 kW (100% MCR)
- Tiempo en puerto [h]
- Tiempo de Navegación en cada etapa [h]
- Número de Pasajeros embarcados
- Carga Rodada Transportada

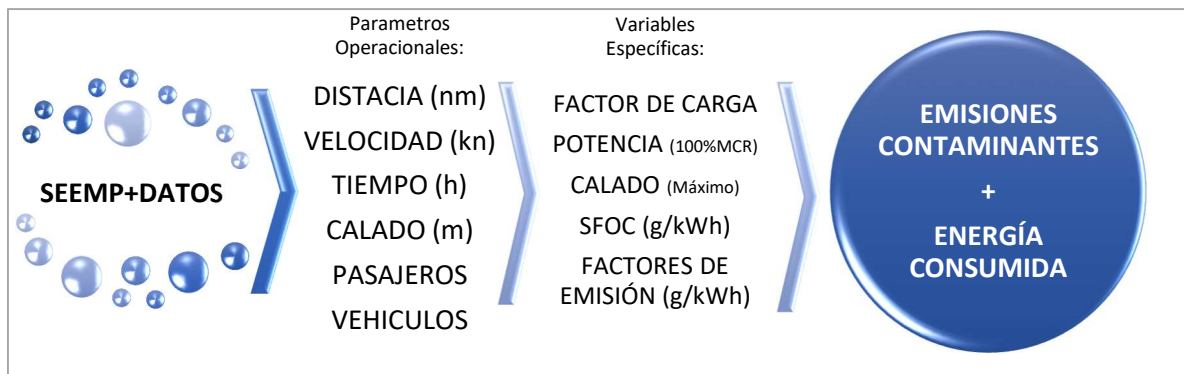


ILUSTRACIÓN 2. CÁLCULO DE ENERGÍA CONSUMIDA Y EMISIONES CONTAMINANTES

Los trayectos realizados por los buques sometidos a estudio se definen como una navegación completa del puerto de origen al puerto de destino. En este caso siempre navegan entre los puertos de Algeciras y Tánger, considerándose como un trayecto total cada vez que se navega la distancia de puerto a puerto. Dentro de lo que consideramos un trayecto completo hay que diferenciar diferentes modos de navegación, los cuales implican variaciones en los factores de carga de los motores y cambios en la velocidad de tránsito del buque. Estas etapas se podrían definir como:

- Operaciones de Desatraque y Atraque
- Maniobras Entrada y Salida en Puerto
- Velocidad reducida por Zona de Velocidad Restringida (SRZ)
- Navegación de Crucero
- Operaciones de Carga y Descarga

En un trayecto normal, los resultados de consumos y emisiones se representarán en función de cada etapa de la navegación. Partimos de que el buque comienza el viaje realizando la etapa de Desatraque, la cual posee una duración media según los datos de a bordo de 0,083 horas y velocidades inferiores a un nudo. A continuación, pasaríamos a la navegación de Maniobra de Salida de puerto, que tiene una duración aproximada de 0,22 horas mientras se cruza esta zona.

Una vez que el buque sale de puerto entra en la denominada Zona de Velocidad Restringida (SRZ) donde la velocidad de crucero reducida es de 12 nudos durante una milla de navegación según los registros tomados de los buques de estudio. Tras esta etapa el buque alcanza su velocidad de navegación y entraría en la etapa denominada como Velocidad de Crucero, donde recorre la mayor distancia del trayecto y se alcanza la velocidad más alta de todas las etapas. A continuación, volveríamos a entrar en Zona de Velocidad Reducida de llegada al puerto de destino, donde se reduciría la velocidad de nuevo a unos 12 nudos y pasaríamos a la siguiente etapa de Maniobra de Entrada en puerto. Seguidamente se realizaría la operación de Atraque y se procedería a un último modo de operación que sería la Carga/Descarga, donde los motores principales no están funcionando y se lleva a cabo el embarque y desembarque tanto del pasaje como de la carga rodada transportada. Esta etapa final del trayecto de los buques Ro-Pax tiene una duración media de 0,83 horas y los únicos consumidores de energía operativos a bordo son los motores auxiliares.

**TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DE LOS DIFERENTES MODOS SEGÚN LA BASE DE DATOS DE A BORDO (TAMAÑO DE LA MUESTRA: 3.093 TRAYECTOS)**

Modos de Navegación durante un trayecto completo	
Crucero	Por encima del 65% MCR, con duración media de 0,81 horas
Velocidad Reducida (SRZ)	12 nudos de velocidad durante aproximadamente 1 milla
Maniobra Entrada/Salida Puerto	Más de 3 nudos a menos del 20% MCR, 0,22 horas de promedio
Atrake/Desatrake	Duración de 0,083 horas por maniobra, entre 1 y 3 nudos
Carga y Descarga	Atracado con una duración media de 0,83 horas y menos de 1 nudo

Los buques con los que se ha trabajado para este estudio poseen una propulsión principal compuesta por dos motores de dos tiempos MAN B&W tipo 9L35MC que desarrollan una potencia de 5.850 kW al 100% MCR cada uno, con unos consumos específicos de combustible según guía de proyecto entre 185 y 172 g/kWh cuando trabaja al 10 y el 85% de carga correspondientemente. La Velocidad Máxima de estos buques es de 19,2 nudos al 100% MCR.

La planta de generación de energía eléctrica de estos barcos está compuesta por dos grupos de diésel-generadores. Cada barco lleva instalados dos generadores accionados por motores de cuatro tiempos MAN B&W HOLEBY tipo 6L28/32, que desarrollan una potencia de 1.250 kW cada uno.

Estos datos no son normalmente conocidos cuando se realizan inventarios energéticos y de emisiones, ya que no es común conocer el motor exactamente y sus curvas de consumo debido a que esta información no suele aparecer en las bases de datos. Estos buques tienen la capacidad de transportar un total de 1.000 personas a bordo como máximo diferenciando entre 20 personas como parte de la tripulación y un total de 980 personas como resto del pasaje. Posee además dos cubiertas para transportar carga rodada con una capacidad de 1.232 metros lineales de carga como para albergar unas 2.332 toneladas entre camiones, camiones tráilers, coches y otros vehículos.

Para desarrollar los objetivos marcados se aplicará el modelo propuesto obtenido de las metodologías comparadas y estudiadas. A continuación, se explicarán las ecuaciones y procedimientos que se emplearán para conseguir los resultados propuestos.

## CÁLCULO DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE

### NAVEGACIÓN CRUCERO

Para realizar los cálculos necesarios para el estudio, uno de los objetivos fundamentales es obtener el consumo energético que se está desarrollando en el buque en cada modo de navegación a lo largo de un trayecto para poder obtener posteriormente las emisiones contaminantes. El consumo energético (kWh), se obtiene del cálculo de la potencia desarrollada (kW) multiplicada por el tiempo (h) durante el cual se genera dicha potencia. El consumo de combustible total de los motores del buque (kg de combustible), es por lo tanto el resultado de multiplicar la potencia desarrollada por cada motor, por su consumo específico de combustible correspondiente durante el tiempo que se trabaje en esas condiciones de carga. Esto queda representado por la ecuación 3 donde se observan los parámetros fundamentales que se necesitan para calcular los kilogramos de combustible que se están consumiendo en cada modo de operación, como se puede apreciar a continuación:

$$FOC = \left(\frac{D}{v}\right) [(ME \times LF_{ME} \times SFOC) + (AE \times LF_{AE} \times SFOC)]$$

3

Donde:

$FOC$  (g): Energía consumida en gramos de combustible

$D$  (nm): Es la distancia que el buque navega en millas náuticas

$v$  (kn): Velocidad media desarrollada por el buque en nudos

$ME$  (kW): Potencia 100% MCR del motor principal en kilovatios

$LF_{ME}$  (%): Factor de Carga de motor principal como fracción de la potencia 100% MCR

$AE$  (kW): Potencia 100% MCR del motor auxiliar

$LF_{AE}$  (%): Factor de Carga de motor auxiliar como fracción de la potencia 100% MCR

$SFOC$  (g/kWh): Consumo específico de combustible de cada motor

A la hora de calcular el factor de carga de los motores principales es necesario tener en cuenta el modo de navegación que se esté realizando. El primer problema que se presenta es el cálculo del factor de carga real de los motores principales. Muchos autores

definen el factor de carga para la situación de navegación en crucero con unos valores comprendidos entre un 75% y 85%, lo cual daría lugar a empezar el cálculo con un error importante arrastrado desde el principio como consecuencia de un margen tan amplio como es un 10%. En algunos inventarios es frecuente utilizar rangos aproximados para el factor de carga de los motores principales aproximados al 80% cuando está en navegación y un 20% cuando se encuentra en modo de maniobras, como se observa en el inventario de emisiones realizado por la Agencia Europea Medioambiental (EEA) de 2016. En nuestro caso de estudio tanto la potencia como velocidad de diseño del barco son conocidas, y la velocidad a la que navega en esta etapa del trayecto es medida en tiempo real, por lo que para calcular la potencia instantánea desarrollada por los motores principales se podrían emplear varios métodos. La ecuación 4, utilizada por la EPA y algunos otros autores, muestra la expresión general para calcular el factor de carga de los motores principales:

$$LF = \frac{P_{tr\acute{a}nsito}}{P_{dise\tilde{n}o}}; P_{tr\acute{a}nsito} = P_{dise\tilde{n}o} \left( \frac{V_{tr\acute{a}nsito}}{V_{dise\tilde{n}o}} \right)^n$$

4

Donde:

$P_{tr\acute{a}nsito}$  (kW): Potencia actual desarrollada por el motor principal en navegación

$P_{dise\tilde{n}o}$  (kW): Potencia de diseño al 100% MCR

$V_{tr\acute{a}nsito}$  (kn): Velocidad actual del barco

$V_{dise\tilde{n}o}$  (kn): Velocidad de diseño del barco al 100% MCR

$n$ : Exponente que define la relación entre la Potencia y la Velocidad del barco

La relación existente entre la potencia del buque y la velocidad, es definida frecuentemente como una relación cúbica. Otros autores utilizan un valor constante de 2,5 para todos los barcos, pero a menudo dicha relación se aproxima más a un exponente superior a tres. El estudio “Principios Básicos de la Propulsión de buques” publicado por MAN Diesel and Turbo en 2012, estimaba dicho exponente entre 3,2 y 4,0 en función del tipo de buque y el sistema de propulsión que posea. De esta forma consideraba: un exponente de 4,0 para buques de gran tamaño y alta velocidad como por ejemplo buques portacontenedores; 3,5 era el valor asignado para buques de mediano tamaño y velocidad,

como portacontenedores pequeños, frigoríficos, Ro-Ro, etc.; y para buques de baja velocidad como petroleros y graneleros considera un exponente de 3,2. Para nuestro caso de estudio, teniendo en cuenta que nos centramos en buques tipo Ro-Pax, se ha elegido el valor de 3,5 para la relación entre la potencia y la velocidad ya que es el valor que se ajusta más a la realidad.

En el modelo STEAM (Ship Traffic Emission Assessment Model) para el cálculo de la potencia real instantánea desarrollada por los motores principales en modo de navegación, se define dicha potencia mediante la ecuación 5, donde se aplica un margen de seguridad en la velocidad de 0,5 nudos con la intención de corregir errores precedentes de las lecturas tomadas a través de bases de datos AIS. En este modelo se parte de la potencia instalada en el buque, pero considerando la potencia MCR un 80% de la instalada, motivo por el cual se multiplica su valor por un coeficiente reductor ( $\varepsilon_p$ ) de 0,8. (Jalkanen, et al., 2009)

$$P_{tr\acute{a}nsito} = \varepsilon_p \times P_{instalada} \left( \frac{V_{tr\acute{a}nsito}}{V_{dise\tilde{n}o} + V_{seguridad}} \right)^3$$

5

Donde:

$P_{tr\acute{a}nsito}$  (kW): Potencia actual desarrollada por el motor principal en navegación

$\varepsilon_p$ : Es el coeficiente reductor para obtener la potencia MCR (igual a 0,8)

$P_{instalada}$  (kW): Potencia propulsora total instalada a bordo

$V_{tr\acute{a}nsito}$  (kn): Velocidad actual del barco

$V_{dise\tilde{n}o}$  (kn): Velocidad de diseño del barco al 100% MCR

$V_{seguridad}$  (kn): Velocidad de seguridad, margen de 5 nudos para compensar errores

Sin embargo, el modelo STEAM no es el más apropiado para el caso de estudio ya que la velocidad instantánea del barco se mide directamente a bordo, por lo que no tendría sentido aplicar el margen de seguridad en la velocidad de navegación medida en el barco. Además, existen otros factores que influyen en la potencia desarrollada a parte de la velocidad del buque. Factores como incrementos en el calado y desplazamiento influyen tanto en el consumo de combustible como en las emisiones producidas, al igual

que las condiciones climatológicas adversas o el ensuciamiento del caso y la hélice (como por el ejemplo las incrustaciones o “fouling”). La IMO en su Tercer Estudio sobre GEI de 2014 propone un modelo con mayor definición donde estos parámetros sí se tienen en consideración (Smith., et al., 2015):

$$P_{tránsito} = \frac{P_{diseño} \left( \frac{t_{tránsito}}{t_{diseño}} \right)^{\left( \frac{2}{3} \right)} \left( \frac{V_{tránsito}}{V_{diseño}} \right)^n}{\eta_w \eta_f}$$

6

Donde:

$P_{tránsito}$  (kW): Potencia actual desarrollada por el motor principal en navegación

$P_{diseño}$  (kW): Potencia de diseño al 100% MCR

$t_{tránsito}$  (m): Calado actual del barco

$t_{diseño}$  (m): Calado de diseño del barco en condición de máxima carga

$V_{tránsito}$  (kn): Velocidad actual del barco

$V_{diseño}$  (kn): Velocidad de diseño del barco al 100% MCR

$\eta_w$ : Variación del rendimiento de la propulsión debido al tiempo

$\eta_f$ : Variación del rendimiento de la propulsión debido al *fouling*

$n$ : Exponente que define la relación entre la Potencia y la Velocidad del barco

En esta ecuación la IMO considera el exponente que relaciona Potencia y Velocidad como tres de forma general. También se utiliza el Coeficiente del Almirantazgo que asume la existencia de una relación entre la Potencia y el Desplazamiento de los buques mediante un exponente con valor de dos tercios, de manera que se contempla la influencia del desplazamiento en el comportamiento del sistema propulsor del barco, lo cual está íntimamente relacionado con la carga transportada. Los coeficientes que expresan los rendimientos debidos a las condiciones climatológicas y al ensuciamiento del caso y hélice tendrían valor de uno en la situación de buena mar y buen estado de mantenimiento del buque.



Esta ecuación 6 ofrece un resultado más preciso para el cálculo de la potencia y será la aplicada al estudio teniendo en cuenta que, al centrarnos en buques tipo Ro-Pax, el exponente para la relación entre la potencia y la velocidad se aproxima más a 3,5 como comentamos anteriormente siendo un detalle importante al adaptar el cálculo al buque de estudio acotando un poco más el margen de incertidumbre. Durante la muestra de estudio la velocidad sobre agua y sobre tierra no representaban variaciones notables, por lo que basándonos en los datos de a bordo, se ha considerado que los valores de la eficiencia de la propulsión debidos al ensuciamiento y el clima no afectaban sensiblemente a los resultados en este caso concreto debido a las particularidades del mismo, manteniéndose prácticamente constantes y próximos a la unidad.

Respecto al factor de carga de motores auxiliares ( $LF_{AE}$ ) durante la condición de navegación de crucero, se ha optado por utilizar para los cálculos un 15% de MCR como valor medio aproximado en base a los datos registrados a bordo y coincidiendo con los criterios EPA. La situación normal de la planta eléctrica cuando el buque navega en esta etapa de la navegación pasa por tener un consumo eléctrico de 375 kilovatios consumiendo combustible pesado (RO) durante el tiempo que dura esta fase del trayecto. Para estas condiciones, teniendo en cuenta los datos correspondientes a los motores auxiliares, las distintas bases de datos asignan un consumo específico medio de 213 g/kWh. Como se explicará en las siguientes líneas, a través de este dato se podrá calcular el consumo específico de combustible de los motores auxiliares correspondiente a su situación de carga a través de las ecuaciones 7 y 8.

El siguiente dato imprescindible para poder calcular el consumo energético en esta fase es el consumo específico de combustible (SFOC). Este valor depende directamente del poder calorífico que posea el combustible utilizado y de la tecnología usada por los motores del buque (MAN Diesel & Turbo, 2012).

Normalmente la mayoría de los autores considera su valor constante en función de si son motores de dos o cuatro tiempos, el rango de potencia que desarrollan y su año de fabricación, variando entre un rango de 170 a 220 g/kWh. En ocasiones se asume un incremento de un 10% cuando se trabaja a muy bajas cargas. Pero, aun así, emplear el consumo específico medio como un valor constante no es muy acertado. Mucho más acorde con el funcionamiento del motor sería tener en cuenta además la carga desarrollada por los motores en cada momento, no utilizando únicamente un valor medio para el

consumo específico de combustible, sino el valor que corresponda para cada carga de los motores.

En este sentido Jalkanen et al. (2012), tras realizar el modelo STEAM2, analizó el comportamiento de los consumos específicos de distintos motores de varios de los fabricantes de los más relevantes del sector marino, concluyendo que dicho parámetro no es una función lineal de la carga del motor. Por este motivo, estos autores asumen que debería utilizarse una función parabólica de segundo grado, basada en un análisis regresivo de los datos del estudio realizado para calcular el consumo específico relativo a la carga ( $SFOC_{Relativo}$ ).

$$SFOC_{Relativo} = 0,455 LF^2 - 0,71 LF + 1,28$$

7

Como se puede apreciar en la ecuación 8, el valor del consumo específico absoluto (g/kWh) para cada caso se obtendría del consumo específico relativo a la carga y del valor medio de referencia ( $SFOC_{base}$ ), que se considera constante para cada motor. (Jalkanen, et al., 2012)

$$SFOC = SFOC_{Relativo} SFOC_{base}$$

8

Los buques estudiados utilizan según los datos de a bordo combustible residual (RO) tanto para sus motores principales como para sus motores auxiliares y combustible destilado (MDO) para los motores auxiliares cuando el buque se encuentra en puerto.

En la tabla 11 se han representado los valores de consumos específicos base utilizados para el cálculo de SFOC en el modo de navegación en crucero para cada tipo de combustible consumido en base a los valores medios utilizados por los principales autores, donde se diferencia entre el tipo de motor, ya sea un motor lento (SSD) de baja velocidad de dos tiempos como es el caso de los motores principales (ME) o de media velocidad (MSD) y cuatro tiempos como es el caso de los motores auxiliares (AE).

TABLA 11. SFCO BASE PARA LOS MOTORES DEL CASO DE ESTUDIO

SFOC <sub>base</sub> (g/kWh)			
Motor	Tipo	RO	MDO
SSD ME	2T	195	-
MSD AE	4T	213	210

*NAVEGACIÓN SRZ (SPEED-RESTRICTED ZONE)*

Durante esta etapa de la navegación el buque se encuentra abandonando o aproximándose a la zona de puerto por lo que debe navegar con una velocidad limitada. Esta fase es denominada también como de Velocidad Reducida o Slow-Steaming del inglés y los buques de estudio registran una velocidad media de 12 nudos. Según la base de datos de a bordo cuando el buque realiza esta etapa del trayecto recorre una distancia media de una milla náutica manteniendo la carga de la planta eléctrica en las mismas condiciones que para el modo de navegación de crucero, es decir, un consumo de 375 kW y consumiendo RO.

Utilizando el mismo procedimiento que para la etapa anteriormente descrita, se procederá a realizar los cálculos de consumo específico en función de las condiciones de carga de los motores principales y auxiliares contemplando el resto de variables particulares de cada trayecto que realiza el buque, como por ejemplo la carga transportada que afectará al desplazamiento del buque como ya se ha mencionado anteriormente.

*NAVEGACIÓN DE MANIOBRA EN PUERTO*

Para el cálculo del consumo energético durante la etapa de maniobra en puerto, con los datos suministrados por el propio barco y para este caso concreto, se considera que los motores principales trabajan al 20% MCR durante 0,22 horas aproximadamente de media sin tener en cuenta las maniobras de atraque y desatraque (5 minutos de media aproximadamente cada una de ellas).

La potencia desarrollada por los motores principales es de 2.340 kW, consumiendo RO con un consumo específico medio de combustible (SFOC<sub>base</sub>) de 195 g/kWh. Aplicando la ecuación 6 se calcularía el valor del consumo específico para esta condición.

Así como en la situación de Navegación Crucero los motores auxiliares consumían solo RO y funcionaban a una carga del 15%, tanto en las maniobras de entrada a puerto como en las de salida, la planta generadora eléctrica del buque suele trabajar con una carga del 45% MCR consumiendo RO y MDO. Esto sucede operando un diésel-generador con cada tipo de combustible mientras se hace la transición de la situación de puerto (todo a combustible destilado) a la situación de navegación (todo a combustible residual) y viceversa.

Para estimar los consumos específicos correspondientes mediante la ecuación 6, se utilizarán los valores de la tabla 11 correspondientes a 213 g/kWh para RO y 210 para MDO.

#### *ATRAQUE Y DESATRAQUE*

En este caso los factores de carga para los motores principales se consideran de un 3,1% MCR para las maniobras de atraque, y de un 3,9% MCR para las maniobras de desatraque. El tiempo aproximado de cada maniobra es de 5 minutos aproximadamente de media según los datos de a bordo correspondientes a 0,083 horas por maniobra.

En estas maniobras de atraque y desatraque se estima que la velocidad del barco se mantiene entre 1 y 3 nudos, conservando las condiciones de la planta eléctrica sin variaciones frente a los parámetros dados en la situación de Navegación en Maniobras de entrada y salida de puerto, siendo 45% el factor de carga de los motores auxiliares consumiendo MDO y RO.

#### *CARGA Y DESCARGA*

Esta etapa en sí no podría considerarse una fase de la navegación debido a que, teóricamente, se considera que la velocidad es inferior a un nudo y que se paran los motores propulsores en la condición de buque atracado. Pero para considerar los cálculos de energía consumida y las emisiones contaminantes generadas durante toda la operativa de un buque, es imprescindible tener en cuenta las operaciones de carga y descarga que se realizan en cada trayecto.

Una vez el buque está amarrado y atracado, la planta propulsora deja de funcionar y los motores auxiliares pasan a trabajar con una carga del 60% MCR durante una duración media de aproximada de 50 minutos (0,83 horas). A lo largo de toda esta fase

de la operativa del barco los motores auxiliares consumen MDO únicamente por motivos de medioambientales.

Durante este proceso se realiza la descarga de los vehículos que se transportan a bordo mientras que se preparan los vehículos que se van a cargar para el próximo trayecto casi en simultaneo. Al mismo tiempo se realiza el desembarque y el embarque del pasaje mediante el exhaustivo control de la tripulación del buque.

Estos tiempos de carga y descarga son vulnerables de sufrir variaciones debido a diversas situaciones como retrasos debidos al pasaje, la carga rodada, tráfico de puerto y otros motivos similares. En la práctica, según los datos del propio buque, tienen margen suficiente para corregir, dentro de las posibilidades, este tipo de contratiempos manteniendo una duración de la operativa muy constante, para que la repercusión en los tiempos del próximo viaje sea la mínima posible.

## **CALCULO DE EMISIONES CONTAMINANTES**

Los cálculos de las emisiones contaminantes producidas por los buques del estudio se van a realizar mediante el uso del consumo de energía o combustible de cada modo de navegación junto con los factores de emisión. Los resultados que se obtendrán dependerán de tipo de contaminantes analizado, el tipo de motor que lo produzca (si es lento o de media velocidad, teniendo en cuenta si su ciclo de trabajo es de 2 o 4 tiempos), el factor de carga al que se encuentre trabajando, el combustible que se esté utilizando (RO o MD) y el estado de mantenimiento del motor. Aunque este último parámetro no suele contemplarse en los inventarios publicados a pesar de su influencia en la producción de NO<sub>x</sub> y CO. (Duran, et al., 2012)

Estos factores de emisión están expresados en gramos de contaminante por kilovatio-hora de trabajo realizado o por gramo de combustible consumido. Las cuantificaciones de emisiones contaminantes producidas por los motores son utilizadas para desarrollar dichos factores de emisión. Para ello, en las metodologías basadas en la actividad del propio buque (bottom-up) utilizan como combustible de referencia o línea base un combustible pesado tipo HFO (Heavy Fuel Oil) con un 2,5% de contenido en azufre.

Respecto a los factores de emisión a aplicar, no termina de haber un criterio definido a nivel internacional, por lo que no hay acuerdo sobre los valores a utilizar a los factores de emisión. Existen recomendaciones de diferentes organismos e instituciones internacionales donde se proponen factores de emisión entre sus directrices como por ejemplo el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2006) o la Unión Europea que describe los valores de sus factores de emisión extrayéndolos de la base de datos de EMEP/EEA (2016). Paralelamente otros factores de emisión han sido también publicados tras diferentes estudios por otros autores y organizaciones como la EPA (2000), el Parlamento y el Consejo Europeo (2010), Cooper y Gustafsson (2004) y el Grupo Consultor Starcrest (2004).

Aplicando los factores de emisión correspondientes a los datos de consumo energético calculado mediante el procedimiento anteriormente descrito se obtiene los datos de emisiones contaminantes producidas durante cada trayecto del buque analizado.

$$EC = \left(\frac{D}{v}\right) [(ME \times LF_{ME} \times EF_{ME}) + (AE \times LF_{AE} \times EF_{AE})]$$

9

Donde:

$EC$  (g): Emisiones Contaminantes en gramos del contaminante estudiado

$D$  (nm): Es la distancia que el buque navega en millas náuticas

$v$  (kn): Velocidad media desarrollada por el buque en nudos

$ME$  (kW): Potencia 100% MCR del motor principal en kilovatios

$LF_{ME}$  (%): Factor de Carga de motor principal como fracción de la potencia 100% MCR

$EF_{ME}$  (g/kWh): Factor de Emisión de los motores principales para cada contaminante

$AE$  (kW): Potencia 100% MCR del motor auxiliar

$LF_{AE}$  (%): Factor de Carga de motor auxiliar como fracción de la potencia 100% MCR

$EF_{AE}$  (g/kWh): Factor de Emisión de los motores auxiliares para cada contaminante

Hay que tener en cuenta que cada factor de emisión es diferente para cada contaminante estudiado y para cada tipo de motor. Normalmente se expresan en gramos de emisión por trabajo desarrollado en kilovatio-hora. Los valores que se han elegido para este estudio

han sido extraídos del análisis comparativo de las metodologías comentadas que fue realizado por Goldsworthy & Galbally (2011) y se pueden observar tabla 12.

TABLA 12. FACTORES DE EMISIÓN USADOS PARA EL ESTUDIO. (GOLDSWORTHY & GALBALLY, 2011)

Tipo de Motor			Factores de Emisión en g(kWh) <sup>-1</sup>					
			CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>
SSD	ME	RO	604	1,38	10,5	18,1	1,5	1,46
MSD	AE	RO	703	1,1	12,3	14,7	1,5	1,46
MSD	AE	MDO	661,4	1,1	2,2	13,9	0,38	0,35

Los factores de emisión tienden a aumentar su valor a medida que disminuye la velocidad de los buques y los factores de carga a los que trabajan los motores, a diferencia de las emisiones contaminantes en masa que tienden a disminuir. Esto sucede cuando la carga disminuye, los consumos específicos de los motores tienden a aumentar y la eficiencia del propio motor disminuye. Por este motivo, los valores de los factores de emisión dados en la tabla 12 son apropiados para los motores principales trabajando a cargas entre el 100% y el 20%. Cuando se trabaje a bajas cargas, por debajo del 20% MCR, es más apropiado utilizar la ecuación 10 desarrollada por la EEA (Energy and Environmental Analysis, Inc) para obtener los algoritmos de ajuste para los valores de factores de emisión de los motores principales corregidos para bajas cargas.

$$E_R = a \times LF^{-x} + b$$

10

Donde:

$E_R$  (g/kWh): Es la tasa de emisión de ajuste por unidad de trabajo

$a$ : Coeficiente

$b$ : Interceptor

$x$ : Exponente (negativo)

Los coeficientes usados para esta ecuación se muestran en la tabla 13. Usando esta ecuación se pueden obtener los factores de ajuste para los factores de emisión en función de la carga que se está desarrollando.

**TABLA 13. COEFICIENTES DE ALGORITMO PARA LOS FACTORES DE EMISIÓN DE LOS MMPP A BAJAS CARGAS**

<b>Coefficiente</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>PM</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
a	0,1255	0,0667	0,8378	0,0059	2,3735	44,1
x	1,5	1,5	1,0	1,5	n/a	1,0
b	10,4496	0,3859	0,1548	0,2551	-0,4792	648,6

Para el caso de los motores auxiliares no es apropiado utilizar ningún tipo de ajuste para los factores de emisión ya que estos ajustes han sido desarrollados para motores funcionando por debajo del 20% MCR y en el caso de los motores diésel-generadores eléctricos, cuando trabajan por debajo de estas cargas, se pueden desconectar uno de estos motores para que otra unidad pueda seguir trabajando en un punto de funcionamiento más apropiado.

**TABLA 14. FACTORES DE AJUSTE PARA BAJAS CARGAS CALCULADOS**

<b>Carga</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>PM</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
1%	11.47	59.28	19.32	19.17	5.99	5.82
2%	4.63	21.18	9.68	7.29	3.36	3.28
3%	2.92	11.68	6.46	4.33	2.49	2.44
4%	2.21	7.71	4.86	3.09	2.05	2.01
5%	1.83	5.61	3.89	2.44	1.79	1.76
6%	1.60	4.35	3.25	2.04	1.61	1.59
7%	1.45	3.52	2.79	1.79	1.49	1.47
8%	1.35	2.95	2.45	1.61	1.39	1.38
9%	1.27	2.52	2.18	1.48	1.32	1.31
10%	1.22	2.20	1.96	1.38	1.26	1.25
11%	1.17	1.96	1.79	1.30	1.21	1.21
12%	1.14	1.76	1.64	1.24	1.18	1.17
13%	1.11	1.60	1.52	1.19	1.14	1.14
14%	1.08	1.47	1.41	1.15	1.11	1.11
15%	1.06	1.36	1.32	1.11	1.09	1.08
16%	1.05	1.26	1.24	1.08	1.07	1.06
17%	1.03	1.18	1.17	1.06	1.05	1.04
18%	1.02	1.11	1.11	1.04	1.03	1.03
19%	1.01	1.05	1.05	1.02	1.01	1.01
20%	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



## CÁLCULOS POR PASAJERO Y CARGA TRANSPORTADA

Tras haber podido calcular el consumo energético y las emisiones contaminantes producidas a la atmósfera durante cada fase del viaje, es necesario cuantificar la carga que se ha transportado. Los buques tipo Ro-Pax poseen la versatilidad de poder transportar tanto pasaje como carga rodada. Como ya se ha comentado anteriormente, es imprescindible conocer la intensidad tanto de energía consumida como de emisiones generadas para poder tener una visión más precisa de la eficiencia del trabajo desarrollado.

Tanto para comprobación y ajuste de los datos de referencia para la determinación de los EEDI, como para la clasificación y asignación del EEOI en base al trabajo realizado por unidad de carga, es muy importante trabajar en la cuantificación de la energía y las emisiones contaminantes por pasajero y tonelada transportada.

En los informes del buque se registran los pasajeros embarcados y los vehículos que se transportan en cada viaje. Esto nos permite realizar su cuantificación y expresar los resultados obtenidos de dos formas diferentes.

Por un lado, podemos representar la cantidad de combustible consumido y la masa de emisiones generadas de cada contaminante por pasajero transportado. En este sentido introduciremos el factor *pasaje transportado* a la ecuación 3, dividimos el resultado entre el número de personas registradas para obtener el combustible consumido por cada trayecto en gramos de combustible por pasajero transportado.

$$FOC_{pax} = \left( \left( \frac{D}{v} \right) [(ME \times LF_{ME} \times SFOC) + (AE \times LF_{AE} \times SFOC)] \right) PAX^{-1}$$

11

De la misma forma que obtenemos el consumo por intensidad de pasaje, podemos conocer la intensidad de contaminantes generados expresado en cantidad de emisiones por pasajero (g/persona) utilizando la ecuación 9 y el número de pasajeros transportados.

$$EC_{pax} = \left( \left( \frac{D}{v} \right) [(ME \times LF_{ME} \times EF_{ME}) + (AE \times LF_{AE} \times EF_{AE})] \right) PAX^{-1}$$

12

Por otro lado, podemos cuantificar la carga transportada en cada viaje y expresar los datos anteriores por tonelada de carga transportada. Para ello es necesario documentar todos los vehículos y el pasaje embarcado en cada trayecto y asignarle su peso medio correspondiente.

Para el caso del pasaje embarcado, los informes estadísticos y de registros realizados a bordo por el personal de puente y cubierta, registran cada persona que se embarca, diferenciando entre: personas con tarjeta de embarque; conductores que acceden junto con los vehículos de carga; y niños menores de uno y cuatro años (exentos de necesitar tarjeta de embarque). A estos datos de personal embarcado se les asigna un peso medio correspondiente a unos 100 kilogramos por persona adulta, 15 kilogramos para niños menores de 4 años y 5 kilogramos para niños menores de un año.

A lo hora de asignar pesos promedios a la carga transportada, los vehículos embarcados implican una atención más delicada. Utilizar el peso de estos vehículos como indicador de la carga transportada es una de las opciones más representativa, pero con frecuencia presenta dificultades a la hora de asignar pesos aproximados debido a la gran variedad y tipos de vehículos existentes. Los registros de a bordo hacen distinción entre nueve tipos diferentes, agrupándolos en dos categorías: turismos y carga (entendiendo como vehículo de carga aquellos cuya carga transportada es significativa frente al peso del vehículo, p.e. camiones y tráilers).

Los pesos medios utilizados frecuentemente en estudios e inventarios suelen heredar datos que a día de hoy son obsoletos ya que los turismos actuales superan normalmente los 1.000 kilogramos de peso, siendo este uno de los valores medios utilizados en la mayoría de los casos. Si atendemos a vehículos de carga como los camiones, furgonetas y tráilers, el mismo ritmo y evolución del mercado ha ido aumentando su capacidad de carga y potencia a lo largo de los años.

Para trabajar con pesos lo más cercano posible a la realidad se han tomado los valores medios utilizados por la tripulación de los barcos de estudio para realizar la estiba de estos vehículos en las cubiertas de carga rodada. La tabla 15 muestra los valores aproximados de los distintos vehículos que se registran a bordo en función de los datos de cada trayecto.

TABLA 15. PESOS APROXIMADOS DE LA CARGA TRANSPORTADA

VEHÍCULOS		PASAJE	
TIPO	PESO (kg)	CLASE	PESO (kg)
Coche:	1.500	Adulto :	100
Furgoneta:	3.500	Niño (< 4 años):	15
Caravana:	3.500	Niño (< 1 año):	5
Camión tráiler:	36.000		
Autobús:	15.000		
Camión:	15.000		
Remolque tráiler/batea:	25.000		
Motocicleta:	200		
Bicicleta:	10		

Mediante esta recopilación de datos y las ecuaciones 3 y 9, podemos calcular el consumo de combustible y las emisiones contaminantes generadas, por tonelada transportada.

$$FOC_{ton} = \left( \left( \frac{D}{v} \right) [(ME \times LF_{ME} \times SFOC) + (AE \times LF_{AE} \times SFOC)] \right) TON^{-1}$$

13

$$EC_{ton} = \left( \left( \frac{D}{v} \right) [(ME \times LF_{ME} \times EF_{ME}) + (AE \times LF_{AE} \times EF_{AE})] \right) TON^{-1}$$

14

Otro cálculo interesante a la hora de evaluar la actividad desarrollada por el transporte marítimo es introducir también la variable de la distancia que se ha navegado y transportado ese pasaje y esa carga. Utilizando los datos de los informes del buque se puede representar los datos anteriores en función de la distancia recorrida y tener así una información mucho más completa de la eficiencia y el impacto medioambiental del trabajo desarrollado en gramos de combustible o de emisión por persona o tonelada y milla náutica navegada.

$$FOC_{(Per \cdot nm)} = \frac{FOC}{(PAX \times D)} ; \quad EC_{(Per \cdot nm)} = \frac{EC}{(PAX \times D)}$$

15

$$FOC_{(ton \cdot nm)} = \frac{FOC}{(TON \times D)} \quad ; \quad EC_{(Per \cdot nm)} = \frac{EC}{(TON \times D)}$$

16

Donde:

$FOC_{(Per \cdot nm)}$  (g/per·nm): Consumo de combustible por persona y milla náutica

$FOC_{(ton \cdot nm)}$  (g/t·nm): Consumo de combustible por tonelada y milla náutica

$EC_{(Per \cdot nm)}$  (g/per·nm): Emisiones contaminantes por pasajero y milla náutica

$EC_{(ton \cdot nm)}$  (g/t·nm): Emisiones contaminantes por tonelada y milla náutica

$PAX$ : Número de pasajeros transportados por viaje

$TON$  (t): Toneladas de carga transportada por viaje

$D$  (nm): Distancia navegada en millas náuticas

## **CAPÍTULO 5**

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS**

A lo largo de este capítulo se van a exponer los resultados obtenidos tras haber aplicado la metodología comentada en el apartado anterior. Para ello se han utilizado los informes y bases de datos de a bordo de los dos buques tipo Ro-Pax que han sido sometidos a estudio. La información utilizada para la aplicación de este trabajo ha sido obtenida principalmente de tres fuentes: la correspondiente a la propia base de datos de registro del SEEMP para ambos buques; las estadísticas de carga y descarga de los oficiales de cubierta; y los informes de diario tanto de los departamentos de puente como de máquinas donde se registran todos los datos de las rondas de diario y los datos de control de los diferentes sistemas de los buques.

En base a lo anterior, todos los datos referentes a las operaciones de los buques han podido ser analizados y registrados durante el periodo de estudio correspondiente a la actividad de dichos buques desde enero hasta julio de 2018. El total de trayectos analizados entre los dos buques suman más de tres mil tránsitos entre los puertos de Algeciras y Tánger.

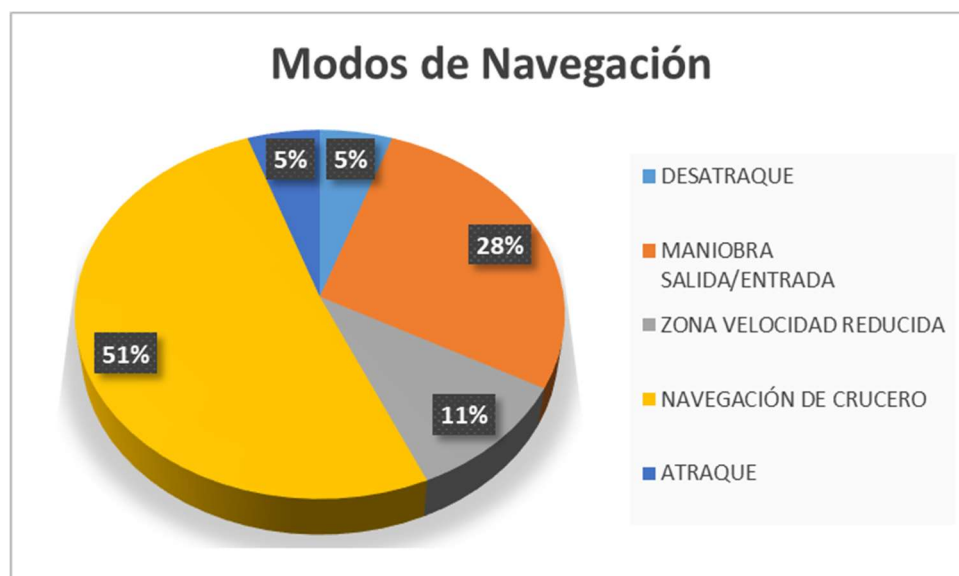


GRÁFICO 4. MODOS DE NAVEGACIÓN POR DURACIÓN DE UN TRAYECTO

Cada trayecto estudiado consta de cinco fases de navegación más una sexta etapa en puerto durante la cual se desarrollan las actividades de carga y descarga. En base a los datos analizados, en la siguiente tabla 16 se puede apreciar los tiempos y distancias medias correspondientes a cada fase de un tránsito entre ambos puertos.

TABLA 16. TIEMPOS Y DISTANCIAS DE CADA FASE DE NAVEGACIÓN

FASES DE NAVEGACION:	TIEMPO aprox.		DISTANCIA NAVEGADA	Velocidad Media
	(en horas)	(en min)		
DESATRAQUE	0,083	5	-	< 1
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	0,44	26,4	3,96	9,00
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	0,167	10	2,00	12,00
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	0,812	49	14,61	17,86
ATRAQUE	0,083	5	-	< 1
CARGA/DESCARGA	0,83	50	-	-
TOTALES:	2,42	145,49	20,57	

La fase de navegación crucero es la que tiene mayor duración y en la que se alcanzan mayores velocidades recorriendo más de la mitad de la distancia total navegada en un viaje completo.

En la tabla 17 se puede observar los consumos específicos calculados en función de los SFOC base utilizados y descritos en la metodología, junto con los factores de carga correspondientes a cada modo de operación. Estos datos son el resultado de aplicar la ecuación 7 y la ecuación 8 con los datos de la carga a la que han trabajado los motores en función del tipo de combustible utilizado.

TABLA 17. CONSUMOS ESPECÍFICOS CALCULADOS PARA CADA MODO DE NAVEGACIÓN

FASES DE NAVEGACIÓN	MMPP		MMAA		
	LF	SFOC [g/kWh]	LF	SFOC [g/kWh]	
		RO		RO	MDO
DESATRAQUE	3,9%	244,34	45%	224,21	221,05
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	20%	225,46	45%	224,21	221,05
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	17,6%	227,94	15%	252,14	-
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	73%	197,37	15%	252,14	-
ATRAQUE	3,1%	245,39	45%	224,21	221,05
CARGA/DESCARGA	0%	-	60%	-	213,74
CONSUMOS MEDIOS:		228,10		235,38	219,22

En el gráfico 5 se aprecia que cuando la carga de los motores principales es más alta, el consumo específico alcanza sus cotas más bajas correspondiendo esto con el modo de navegación en crucero.

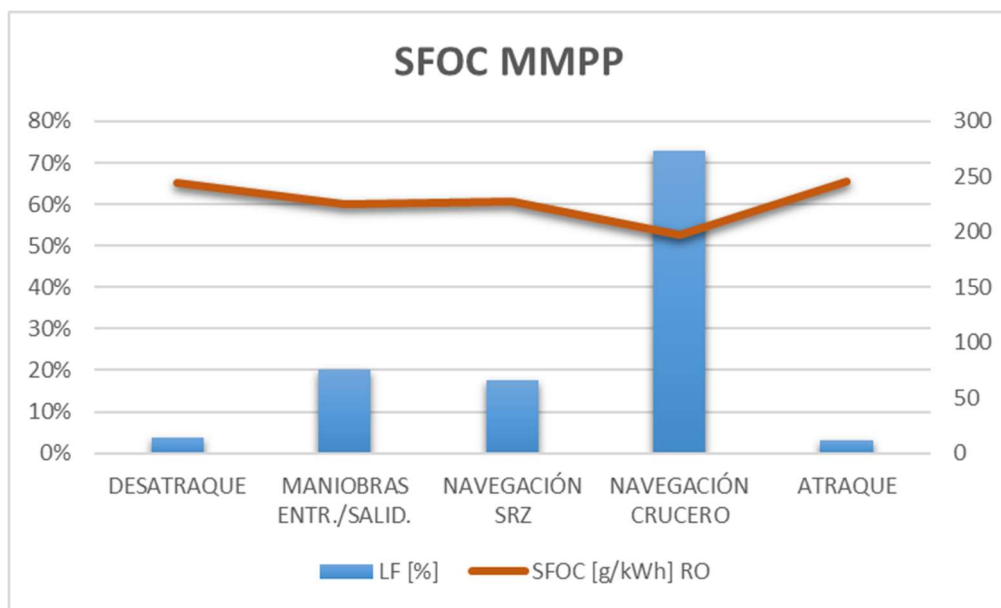


GRÁFICO 5. SFOC MOTORES PRINCIPALES



Respecto a los motores auxiliares, los consumos específicos más altos los encontramos en los modos de navegación fuera de puerto, es decir, durante los periodos de velocidad reducida, en las proximidades a la entrada y salida de puerto, y la navegación crucero.

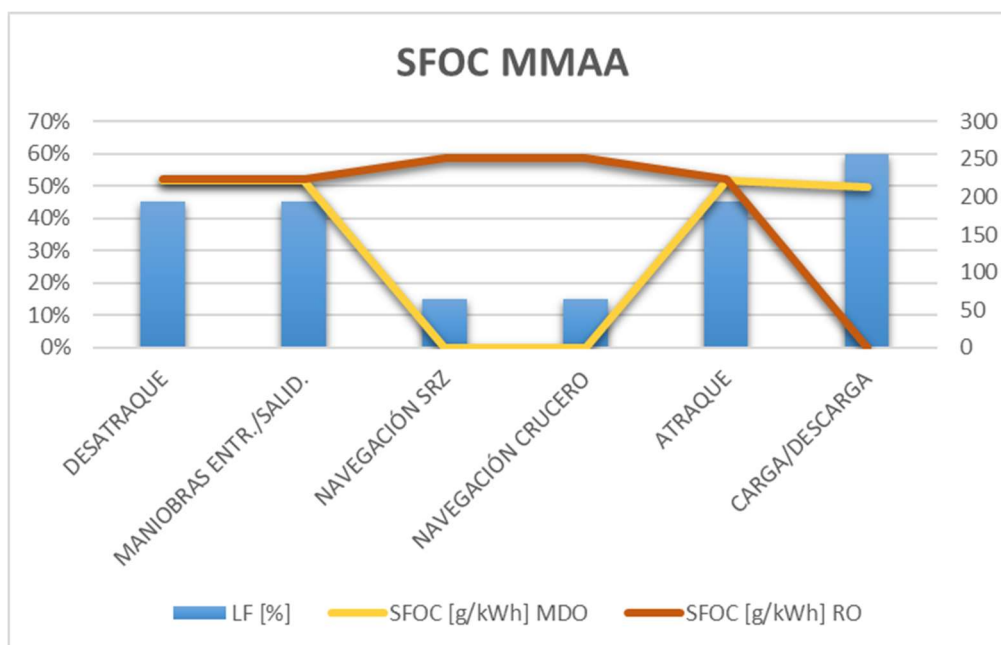


GRÁFICO 6. SFOC MOTORES AUXILIARES

El consumo energético lo podemos expresar por unidad de trabajo en kilovatio-hora (kWh) o por masa de combustible consumido (kg o t), si tenemos en cuenta sus consumos específicos.

En la tabla 18 y 19 se recogen los valores medios de los buques durante el periodo de estudio, diferenciando por tipo de motor y combustible utilizado.

TABLA 18. CONSUMO ENERGÉTICO DE MOTORES PRINCIPALES POR TRAYECTO

FASES DE NAVEGACIÓN	CONSUMOS MMPP	
	RO [kg]	[kWh]
DESATRAQUE	9,29	38,02
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	232,13	1029,60
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	78,09	3425,91
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	1366,90	6931,16
ATRAQUE	7,42	30,22
CARGA/DESCARGA	0,00	0,00
TOTALES:	1693,83	11454,92

TABLA 19. CONSUMO ENERGÉTICO DE MOTORES AUXILIARES POR TRAYECTO

FASES DE NAVEGACIÓN	CONSUMO MMAA			
	RO [kg]	[kWh]	MDO [kg]	[kWh]
DESATRAQUE	10,51	46,87	10,36	131,77
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	55,49	247,50	54,71	1524,60
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	15,76	62,50	0,00	3488,41
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	77,08	306,25	0,00	7237,41
ATRAQUE	10,51	46,87	10,36	123,97
CARGA/DESCARGA	0,00	0,00	133,59	0,00
TOTALES:	169,35	710,00	209,02	12506,17

Como se puede observar en las tablas anteriores, los buques Ro-Pax estudiados obtienen un consumo energético medio por viaje de 2,07 toneladas de combustible de las cuales 1,69 toneladas serían de RO y 0,209 toneladas corresponderían al consumo de MDO. En términos de trabajo realizado, las cifras por viaje serían de 24.671,09 kWh, donde 11.454,92 kWh corresponden a los motores principales y 13.216,17 kWh a la generación de energía eléctrica por parte de los motores auxiliares.

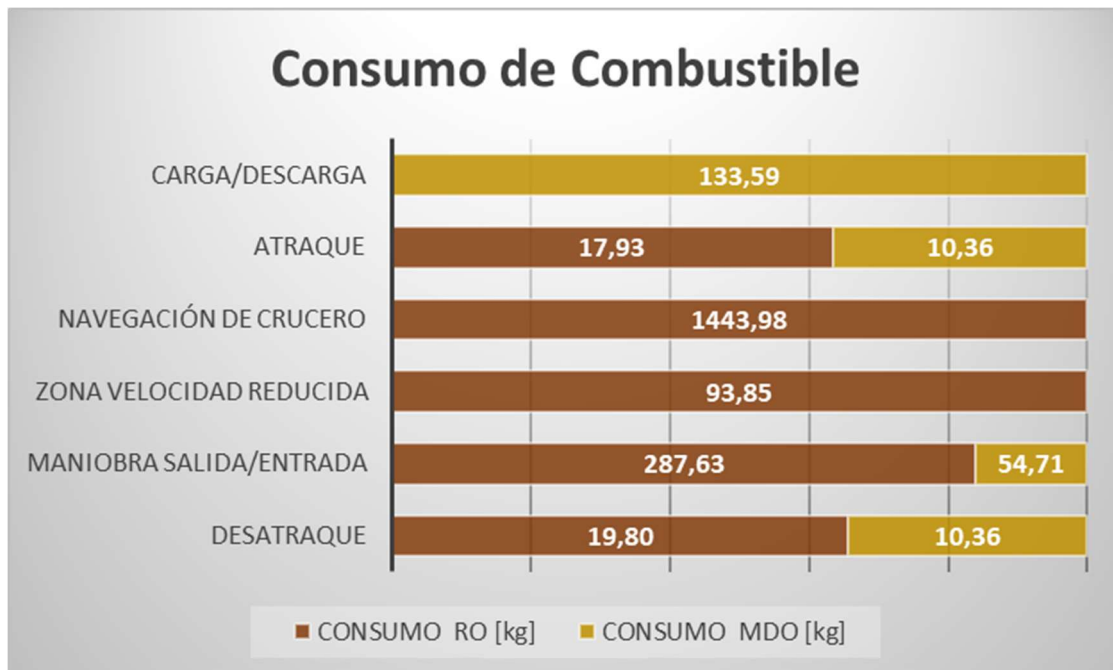


GRÁFICO 7. CONSUMOS DE COMBUSTIBLES TOTAL EN KILOGRAMOS POR TRAYECTO

Respecto a estos datos de combustibles, evaluando los dos barcos estudiados, se obtienen unos valores de 2.090 kg de combustible (RO + MDO) del buque A y 2.054,68 kg (RO + MDO) del buque B, con un porcentaje de diferencia de uno respecto al otro del 1,7%.

En la tabla 20 se representan las emisiones correspondientes a los motores principales en kilogramos de contaminante, en función de los factores de emisión elegidos según el criterio expuesto en la metodología y teniendo en cuenta su correspondiente variación cuando los motores principales trabajan a bajas cargas, aplicando la ecuación 10 para el ajuste correspondiente de los factores de emisión a emplear.

**TABLA 20. EMISIONES CONTAMINANTES DE MOTORES PRINCIPALES POR TRAYECTO**

FASES DE NAVEGACIÓN	MMPP EMISIONES [kg]						Totales:
	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	
DESATRAQUE	22,95	0,33	0,40	1,94	0,24	0,23	<b>26,10</b>
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	621,47	1,42	10,81	18,64	1,54	1,50	<b>655,38</b>
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	211,20	0,51	3,61	6,30	0,53	0,51	<b>222,65</b>
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	4183,65	9,56	72,78	125,45	10,40	10,12	<b>4411,96</b>
ATRAQUE	18,24	0,26	0,32	1,54	0,19	0,19	<b>20,74</b>
CARGA/DESCARGA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
TOTALES:	<b>5057,51</b>	<b>12,08</b>	<b>87,92</b>	<b>153,88</b>	<b>12,90</b>	<b>12,55</b>	<b>5336,83</b>

(tamaño muestra = 3.093 trayectos analizados)

El modo de navegación en crucero es el que mayor cantidad de emisiones produce con un porcentaje del 83% de las emisiones producidas por los motores principales en un trayecto completo, siendo el CO<sub>2</sub> el contaminante con mayor presencia en todas las diferentes fases y representando un 94,77% del total de las emisiones generadas por la planta propulsora de estos buques.

En el gráfico 8 se puede observar con mayor claridad la representación del porcentaje de cada emisión contaminante en cada modo de navegación, donde el CO<sub>2</sub> es claramente la emisión más alta y el resto de emisiones varía en porcentajes inferiores al 20% según la fase del trayecto que se esté realizando.

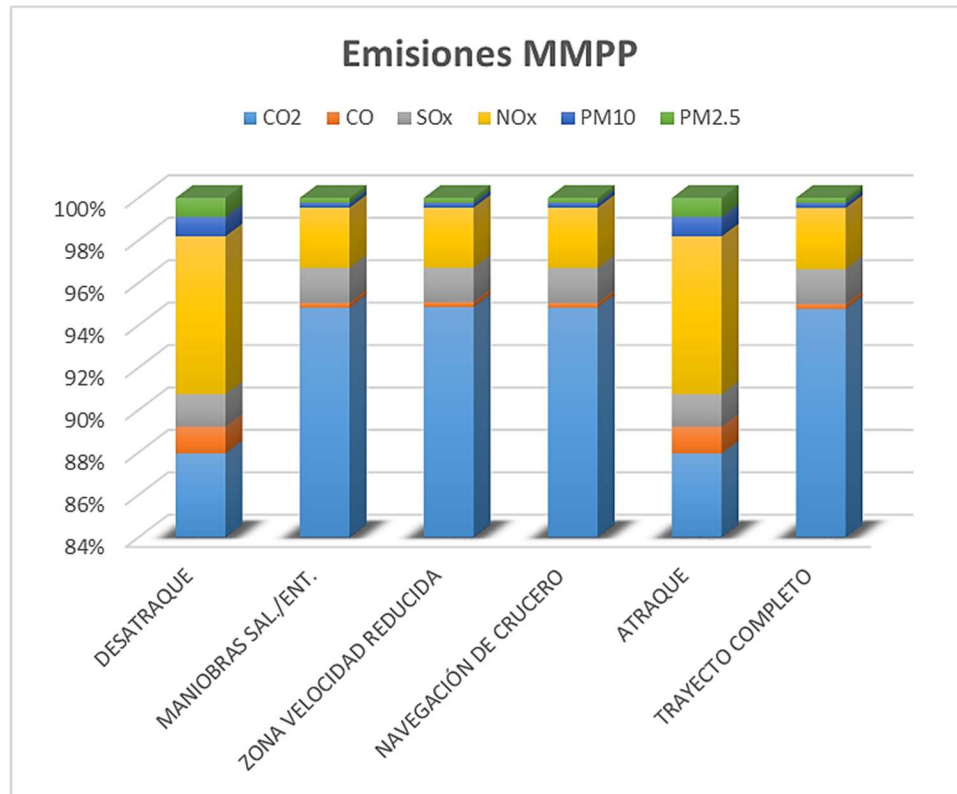


GRÁFICO 8. PORCENTAJES DE EMISIONES CONTAMINANTES DE MMPP

TABLA 21. EMISIONES CONTAMINANTES DE MOTORES AUXILIARES POR TRAYECTO

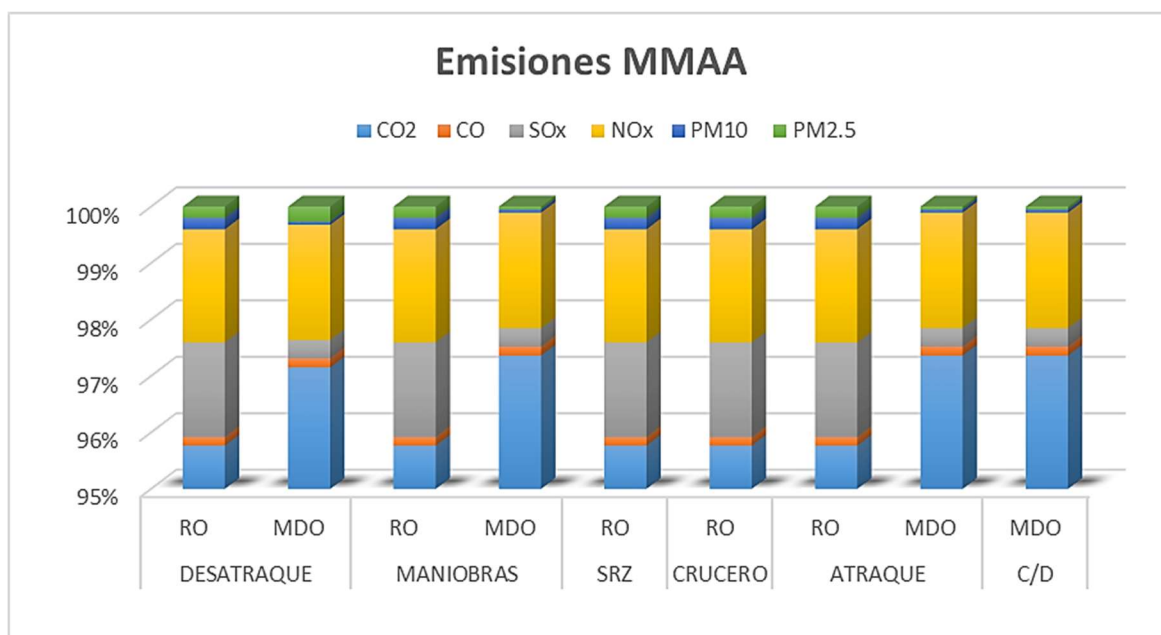
FASES DE NAVEGACIÓN	MMAA EMISIONES [kg]							
	FUEL	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	Totales
DESATRAQUE	RO	32,93	0,052	0,577	0,689	0,070	0,068	<b>34,39</b>
	MDO	31,00	0,052	0,103	0,652	0,018	0,085	<b>31,91</b>
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	RO	173,89	0,272	3,044	3,638	0,371	0,361	<b>181,58</b>
	MDO	163,70	0,272	0,545	3,440	0,094	0,087	<b>168,13</b>
SRZ	RO	43,91	0,069	0,769	0,919	0,094	0,091	<b>45,85</b>
NAVEGACIÓN CRUCERO	RO	48,349	0,076	0,846	1,012	0,103	0,100	<b>50,49</b>
ATRAQUE	RO	32,93	0,052	0,577	0,689	0,070	0,068	<b>34,39</b>
	MDO	31,00	0,052	0,103	0,652	0,018	0,016	<b>31,84</b>
CARGA/DESCARGA	MDO	413,37	0,687	1,375	8,687	0,237	0,219	<b>424,58</b>
TOTALES:		<b>971,10</b>	<b>1,58</b>	<b>7,94</b>	<b>20,38</b>	<b>1,08</b>	<b>1,10</b>	<b>1003,17</b>

(tamaño muestra = 3.093 trayectos analizados)

Las emisiones generadas por los motores auxiliares se pueden observar en la tabla 21 donde se hace diferencia entre los diferentes modos de navegación y el combustible utilizado en función de la operativa.

Los buques sometidos a estudio generan aproximadamente una tonelada de emisiones contaminantes procedentes de su planta generadora eléctrica compuesta por sus motores auxiliares, de las cuales 656,47 kg son generadas por consumo de combustible MDO y 346,7 kg son procedentes del consumo de combustible RO, es decir, los motores auxiliares emiten un 65,43% de emisiones derivadas del consumo de combustible destilado y un 34,56% de emisiones correspondientes al consumo de combustible pesado residual.

En el gráfico 9 podemos apreciar que, como es evidente, las emisiones de SO<sub>x</sub> durante los modos en los que se consume ambos combustibles simultáneamente en los motores auxiliares, es claramente más elevada en los diésel-generadores que trabajan en modo RO ya que dichas emisiones dependen directamente de la concentración de azufre en el combustible.



**GRÁFICO 9. PORCENTAJES DE EMISIONES CONTAMINANTES DE MMAA**

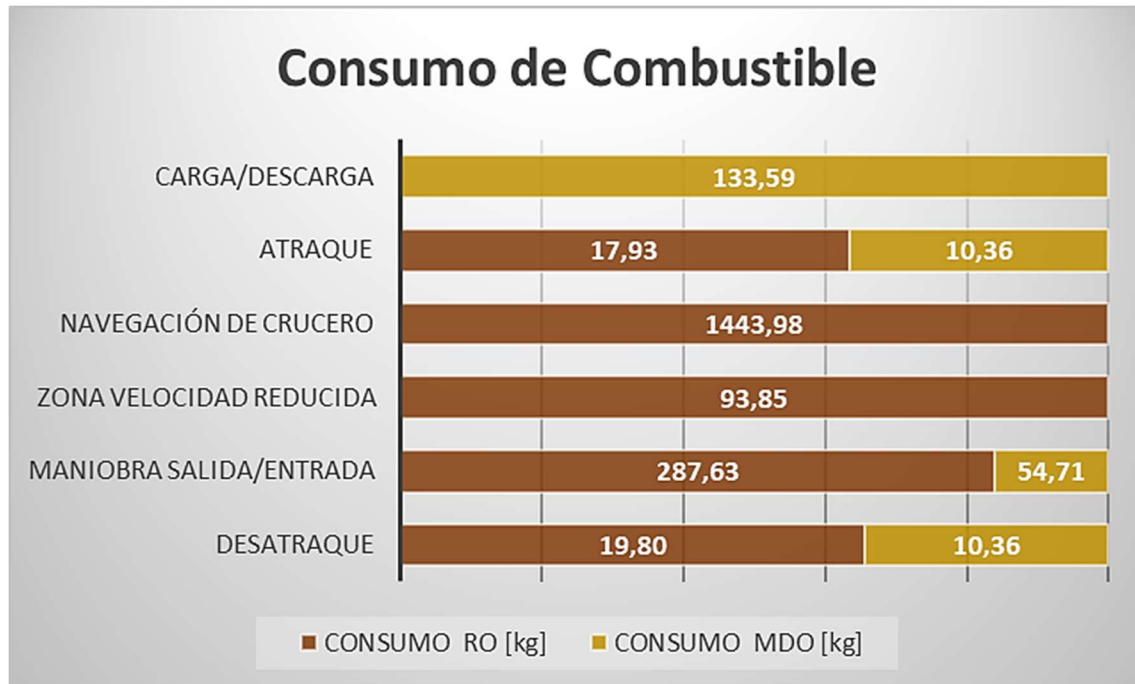


GRÁFICO 10. KILOGRAMOS DE EMISIONES DE MMAA POR TIPO DE COMBUSTIBLE UTILIZADO

Una vez obtenidos los resultados de las emisiones correspondientes a la planta propulsora y a la planta generadora eléctrica de los buques estudiados, se recoge en la tabla 22 los datos estimados de emisiones totales generadas por trayecto realizado.

TABLA 22. VALORES PROMEDIO DE EMISIONES TOTALES DE MMPP Y MMAA POR TRAYECTO

FASES DE NAVEGACIÓN	EMISIONES MMPP y MMAA [kg]						
	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	Totales:
DESATRAQUE	86,89	0,43	1,08	3,28	0,33	0,39	92,40
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	959,06	1,97	14,40	25,71	2,01	1,95	1005,10
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	303,46	0,65	5,23	8,23	0,72	0,70	318,99
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	4231,99	9,64	73,62	126,47	10,50	10,22	4462,44
ATRAQUE	51,18	0,31	0,89	2,23	0,26	0,25	55,13
CARGA/DESCARGA	413,37	0,69	1,37	8,69	0,24	0,22	424,58
TOTALES:	6045,95	13,69	96,60	174,61	14,06	13,74	6358,65

(tamaño muestra = 3.093 trayectos analizados)

El CO<sub>2</sub> es el contaminante con mayor presencia, siendo de un 94% del total de las emisiones producidas y alcanzando casi seis toneladas en masa de las emisiones emitidas. Del 6% restante, son los NO<sub>x</sub> los que siguen la lista con 174,61 kg de emisión

contaminante generadas por cada viaje que realiza cada buque. En el gráfico 11 se puede apreciar con mayor claridad las proporciones medias de cada contaminante por trayecto completo realizado.

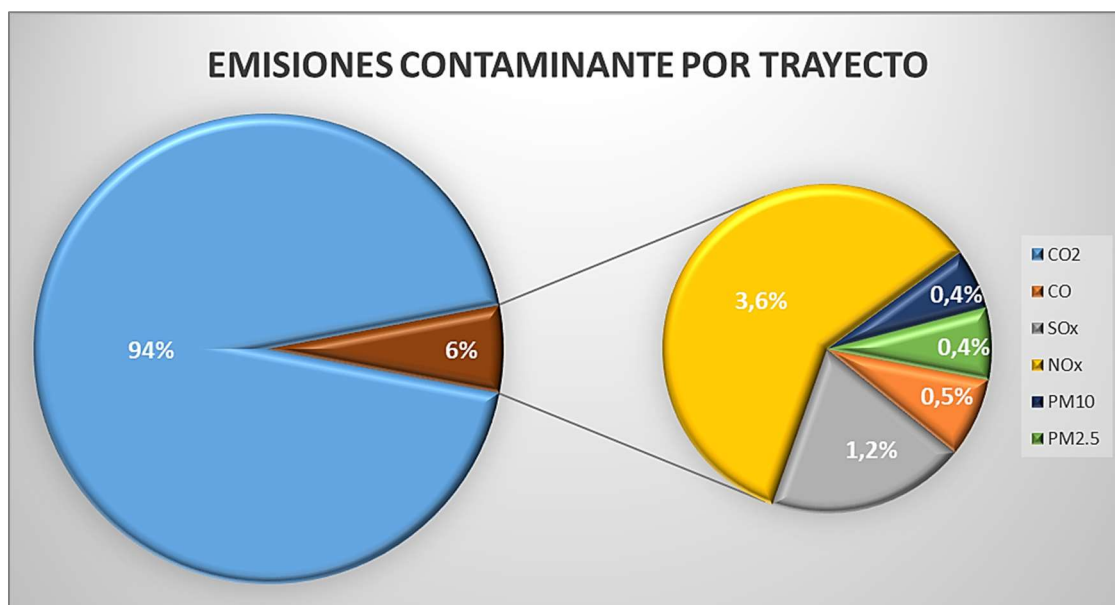


GRÁFICO 11. EMISIONES CONTAMINANTES DE MMPP Y MMAA POR TRAYECTO COMPLETO

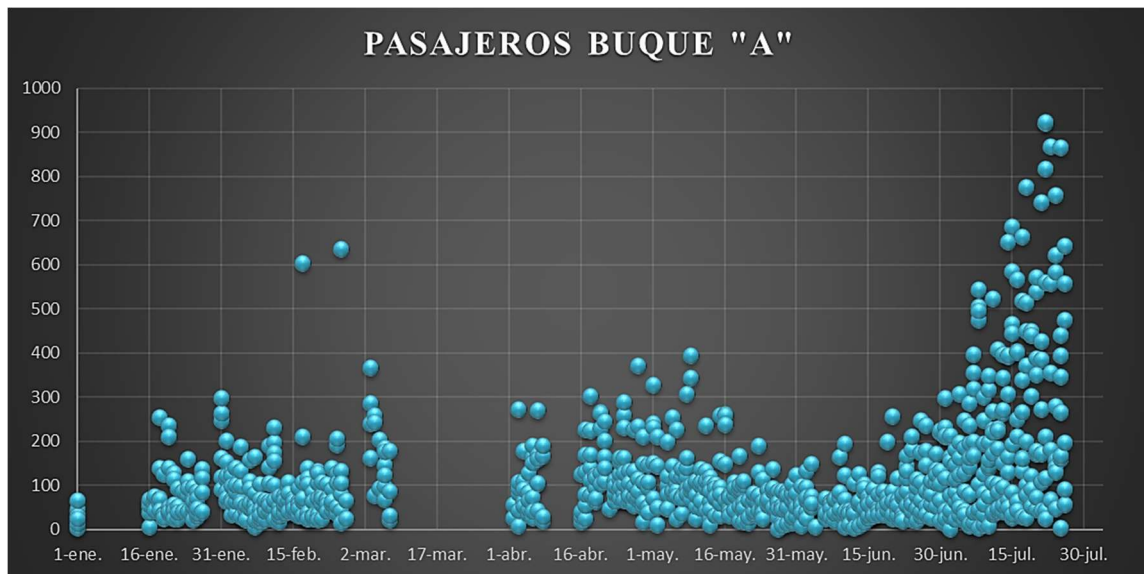
Una vez analizado el consumo energético de los buques y sus correspondientes emisiones contaminantes producidas de la actividad desarrollada, es necesario estudiar la carga transportada para poder obtener a través del modelo propuesto en la metodología, los datos tanto de consumo como de emisiones, pero por intensidad de trabajo desarrollado.

El volumen de carga transportada varía en función de muchos factores propios del transporte marítimo en sí, la época del año, los precios de otras alternativas y la competencia entre diferentes compañías navieras, hacen difícil predecir y determinar los valores de pasaje y vehículos a transportar.

Según los datos de a bordo se pudo ver en los gráficos 12 y 13 la evolución de los pasajeros transportados en el periodo de estudio por ambos buques Ro-Pax. El buque “A” posee dos periodos en los que no realiza trayectos debido a paradas técnicas registrados en la primera quincena de enero y parte del mes de marzo. Se puede apreciar una

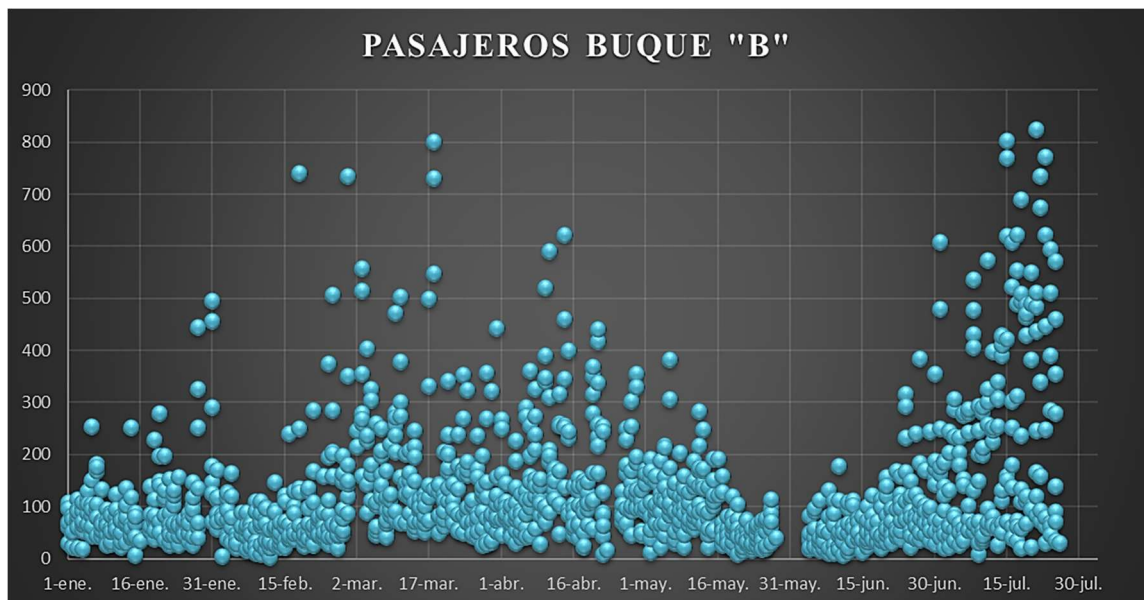


tendencia de aumento del pasaje a lo largo del mes de julio provocado por el periodo vacacional y la conocida como Operación de Paso del Estrecho (OPE).



**GRÁFICO 12. PASAJEROS TRANSPORTADOS DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO POR EL BUQUE "A"**

Respecto al buque “B” se aprecia como mantiene su operativa con algunas paradas menores en duración que el otro buque de estudio y con la misma tendencia de incremento del pasaje en la proximidad del mes de julio.



**GRÁFICO 13. PASAJEROS TRANSPORTADOS DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO POR EL BUQUE "B"**

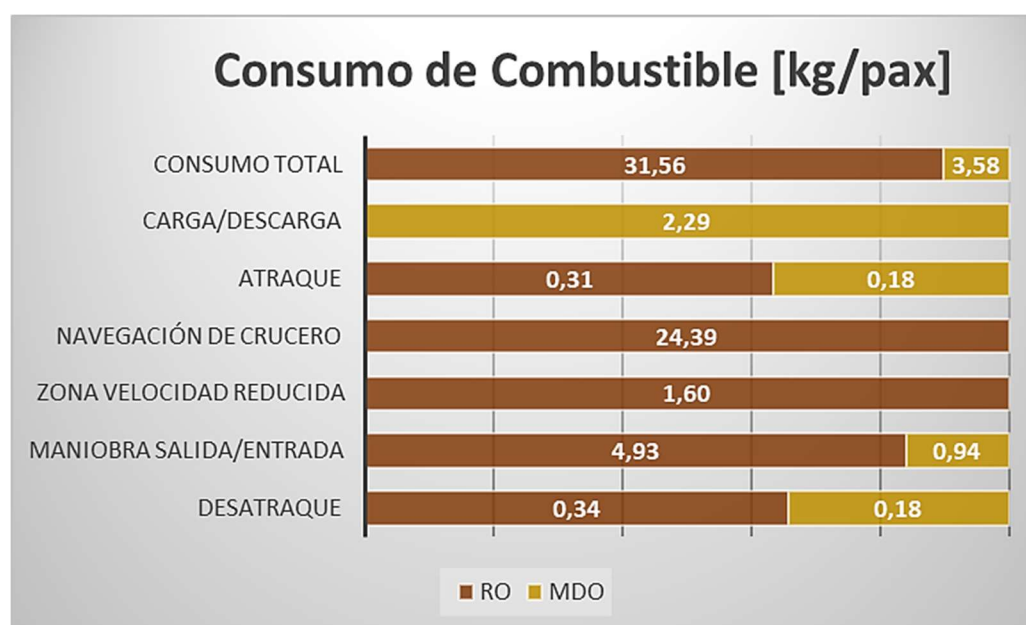


Durante los siete meses de datos analizados se transportaron un total de 182.236 pasajeros entre ambos barcos incluyendo pasajeros con tarjeta de embarque, niños menores de cuatro años y conductores de vehículos transportados.

**TABLA 23. CONSUMO ENERGÉTICO POR TRAYECTO EN KILOGRAMOS DE COMBUSTIBLE POR PASAJERO TRANSPORTADO**

FASES DE NAVEGACIÓN	CONSUMOS POR PASAJERO TRANSPORTADO [kg/pax]			
	MMPP	MMAA		Totales
	RO	RO	MDO	
DESATRAQUE	0,16	0,18	0,18	<b>0,52</b>
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	3,98	0,95	0,94	<b>5,86</b>
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	1,33	0,27	0,00	<b>1,60</b>
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	23,08	1,30	0,00	<b>24,39</b>
ATRAQUE	0,13	0,18	0,18	<b>0,48</b>
CARGA/DESCARGA	0,00	0,00	2,29	<b>2,29</b>
Totales:	<b>28,68</b>	<b>2,88</b>	<b>3,58</b>	<b>35,14</b>

En la tabla 23 se muestran los consumos medios por trayecto, modo de navegación, motores y tipo de combustible. Este consumo energético está representado por kilogramo de combustible y persona transportada. Estos buques tipo Ro-Pax consumirían por viaje 31,56 kilogramos de combustible RO por cada pasajero transportado y 3,58 kilogramos de combustible MDO.



**GRÁFICO 14. CONSUMOS DE COMBUSTIBLES TOTALES POR TRAYECTO Y PASAJERO**

Si prestamos atención a las emisiones contaminantes, obtenemos las siguientes tablas donde se recogen los resultados de los gramos de emisión por cada pasajero transportado, tanto de los motores principales como de los motores auxiliares.

**TABLA 24. EMISIONES DE MMPP POR GRAMO DE CONTAMINANTE Y PASAJERO TRANSPORTADO**

MMPP EMISIONES POR PASAJERO [g/pax]							
FASES:	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	Totales
DESATRAQUE	393,03	5,63	6,84	33,25	4,11	4,00	<b>446,86</b>
MANIOBRAS	10641,98	24,33	185,12	319,12	26,45	25,74	<b>11222,74</b>
SRZ	3672,07	9,17	61,71	109,02	9,17	8,93	<b>3870,08</b>
CRUCERO	70650,02	161,53	1229,00	2118,56	175,57	170,89	<b>74505,58</b>
ATRAQUE	312,41	4,47	5,43	26,43	3,27	3,18	<b>355,20</b>
CAR/DESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Totales:	<b>85669,5</b>	<b>205,1</b>	<b>1488,1</b>	<b>2606,4</b>	<b>218,6</b>	<b>212,8</b>	<b>90400,5</b>

En la tabla 25 corresponde a las emisiones procedentes de la planta eléctrica de los buques en los diferentes modos y tipo de combustible utilizado en cada momento. Al expresarse por cada pasajero transportado hay datos que obtienen valores relativamente muy bajos por lo que es más interesante los valores totales por modo de navegación y por tipo de emisión contaminante.

**TABLA 25. EMISIONES DE MMAA POR GRAMO DE CONTAMINANTE Y PASAJERO TRANSPORTADO**

MMAA EMISIONES POR PASAJERO [g/pax]													
FASES:	CO <sub>2</sub>		CO		SO <sub>x</sub>		NO <sub>x</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>		Total
	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	
DESATR.	563,97	530,90	0,88	0,88	9,87	1,77	11,80	1,77	1,20	11,16	1,17	0,28	1235,7
MANIOBR.	2977,7	2803,1	4,66	4,66	52,13	9,32	62,30	58,91	6,36	1,61	6,19	1,48	6516,0
SRZ	751,96	0,00	1,18	0,00	13,16	0,00	15,73	0,00	1,61	0,00	1,56	0,00	854,36
CRUCERO	739,83	0,00	1,16	0,00	12,95	0,00	15,48	0,00	1,58	0,00	1,54	0,00	825,67
ATRAQUE	563,97	530,90	0,88	0,88	9,87	1,77	11,80	11,16	1,20	0,31	1,17	0,28	1234,1
CAR/DESC.	0,00	375,98	0,00	0,59	0,00	6,58	0,00	7,87	0,00	0,80	0,00	0,78	427,18
Totales:	6076,2	4614,5	9,51	7,63	106,37	21,15	127,13	86,72	12,97	15,10	12,63	3,08	11093
	10690,7		17,15		127,52		213,85		28,07		15,70		

Según los resultados mostrados en las tablas anteriores, se muestra que, de las emisiones producidas, la mayor parte son de CO<sub>2</sub> con unos 96,4 kg de contaminante por pasajero transportado, el siguiente contaminante son los NO<sub>x</sub> con unos 2,8 kg por pasajero, seguido de los SO<sub>x</sub> con 1,6 kg por pasajero y el CO junto con el material particulado con valores entre los 220 y 247 gramos de contaminante por pasajero transportado.

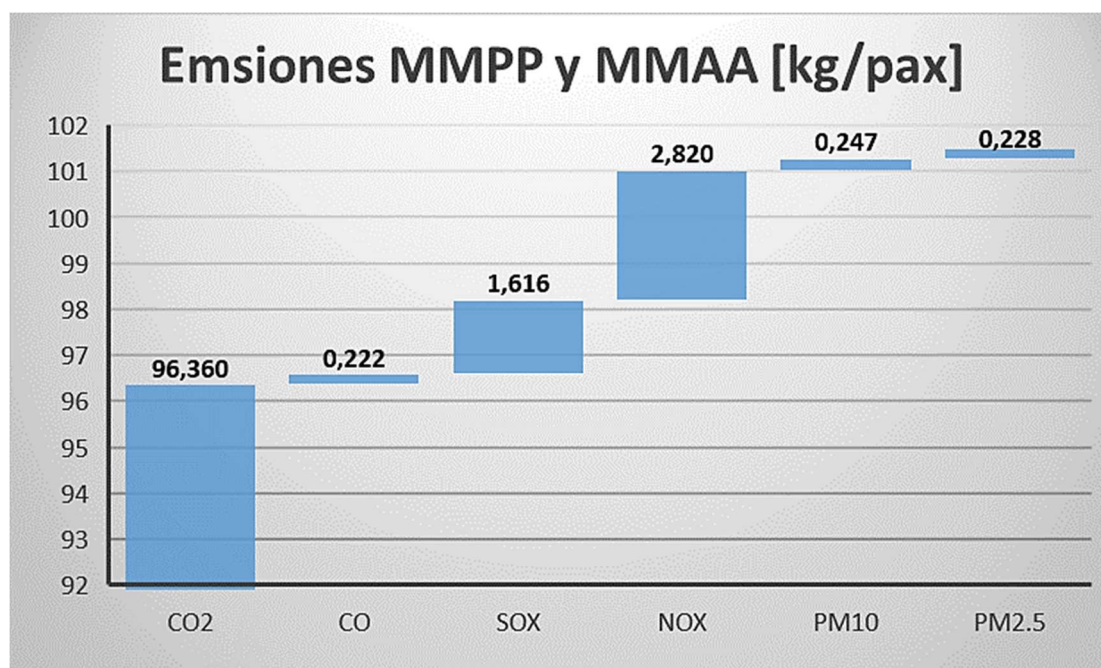
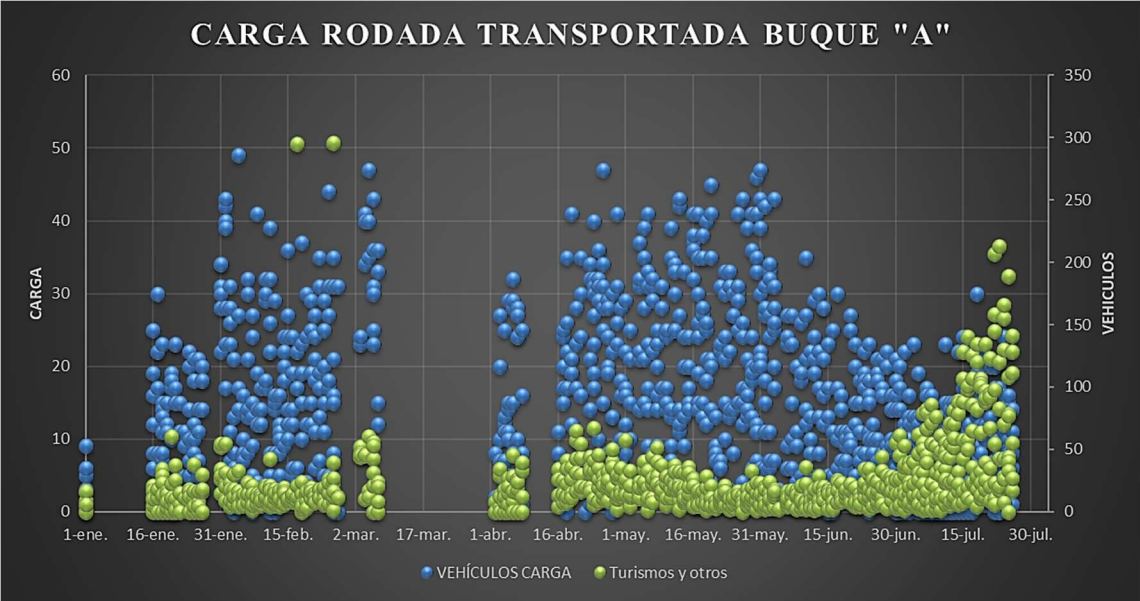


GRÁFICO 15. EMISIONES TOTALES POR TRAYECTO EN KILOGRAMOS DE CONTAMINANTE POR PASAJERO

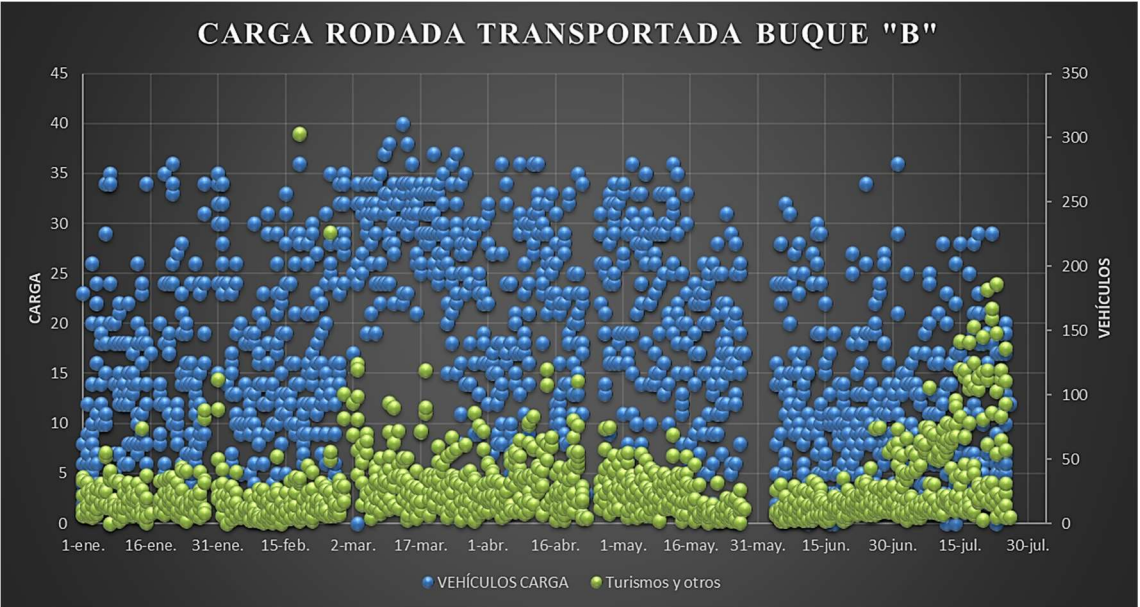
En cuanto a la carga transportada por viaje, es necesario estimar por un lado el peso del pasaje que se transporta en cada trayecto, y por otro lado los vehículos transportados y su peso aproximado correspondiente. Dentro de la carga rodada transportada es frecuente diferenciar entre el transporte de carga y el resto de vehículos, donde se podrían agrupar los turismos y otros vehículos no considerados como transportes de mercancías.

En los gráficos 16 y 17 se muestra la evolución de los vehículos transportados durante los meses estudiados. En total los ferris Ro-Pax sometidos a estudio han transportado un total de 98.936 vehículos, de los cuales 59.014 fueron vehículos turismos y 39.922 fueron vehículos de carga.



**GRÁFICO 16. CARGA RODADA TRANSPORTADA POR EL BUQUE "A" EN EL PERIODO DE ESTUDIO POR TRAYECTO**

En verde se puede observar como los turismos y otros vehículos no destinados al transporte de mercancías tienen un incremento en el mes de julio en ambos buques debido al comienzo de la OPE, mientras que los vehículos de carga (camiones, remolques y bateas) tienen un volumen de carga variable sin que se observe que le afecte el periodo vacacional y el incremento de trasbordos de la operación paso del estrecho de los meses de julio y agosto.



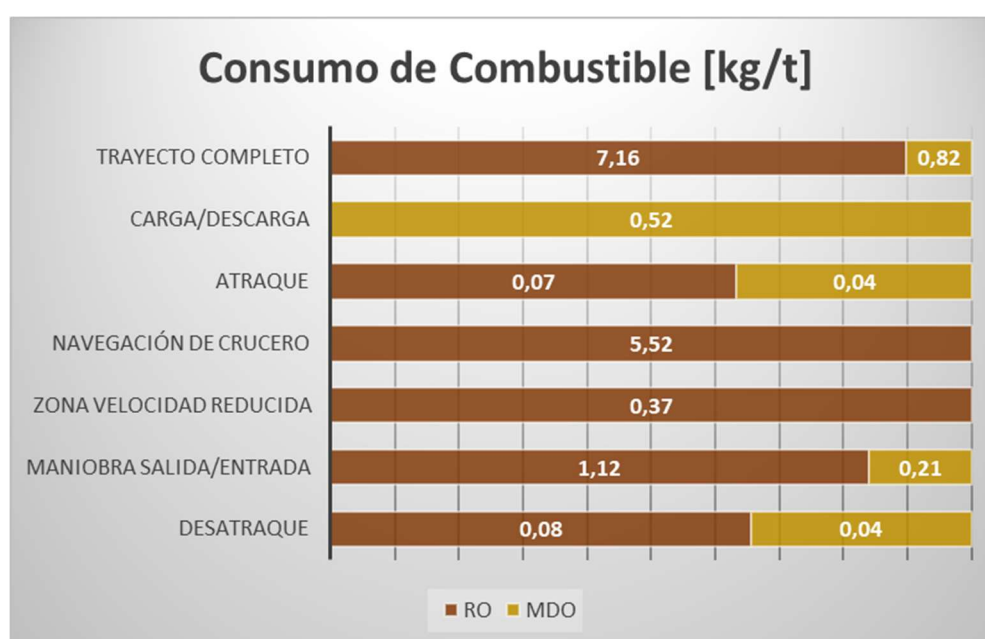
**GRÁFICO 17. CARGA RODADA TRANSPORTADA POR EL BUQUE "B" EN EL PERIODO DE ESTUDIO POR TRAYECTO**

Tomando como referencia los pesos estimados en el apartado del cálculo de la carga transportada en la metodología, podemos asignar los kilogramos aproximados para cada tipo de vehículo. Estos datos más el peso correspondiente al pasaje de cada trayecto, nos ofrecen la posibilidad de expresar los resultados de consumos y emisiones en kilogramos de combustible y contaminantes por kilogramo de carga transportada.

**TABLA 26. CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR TONELADA DE CARGA TRANSPORTADA EN CADA TRAYECTO**

<b>CONSUMOS POR CARGA TRANSPORTADA [kg/t]</b>				
<b>FASES DE LA NAVEGACIÓN</b>	<b>MMPP</b>	<b>MMAA</b>		<b>Totales</b>
	<b>RO</b>	<b>RO</b>	<b>MDO</b>	
DESATRAQUE	0,04	0,04	0,04	<b>0,12</b>
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	0,91	0,22	0,21	<b>1,34</b>
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	0,31	0,06	0,00	<b>0,37</b>
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	5,22	0,30	0,00	<b>5,52</b>
ATRAQUE	0,03	0,04	0,04	<b>0,11</b>
CARGA/DESCARGA	0,00	0,00	0,52	<b>0,52</b>
Totales:	<b>6,50</b>	<b>0,66</b>	<b>0,82</b>	<b>7,97</b>

Como se muestra en la tabla 26, se obtiene un consumo medio de 7,16 kilogramos de combustible residual por cada tonelada transportada y 0,82 kilogramos de MDO correspondientes principalmente a las operaciones de carga y descarga en puerto más las maniobras dentro del mismo.



**GRÁFICO 18. CONSUMO DE COMBUSTIBLE TOTALES POR TONELADA TRANSPORTADA Y TRAYECTO**



Las emisiones contaminantes producidas por cada tonelada transportada expresan el impacto atmosférico que se genera de la actividad de transportar dicha carga. En la tabla 27 se muestran los gramos que emiten los motores principales por cada tonelada de carga transportada en cada trayecto, en función de cada tipo de contaminante.

**TABLA 27. EMISIONES CONTAMIANTES DE MMPP POR TONELADA TRANSPORTADA EN CADA TRAYECTO**

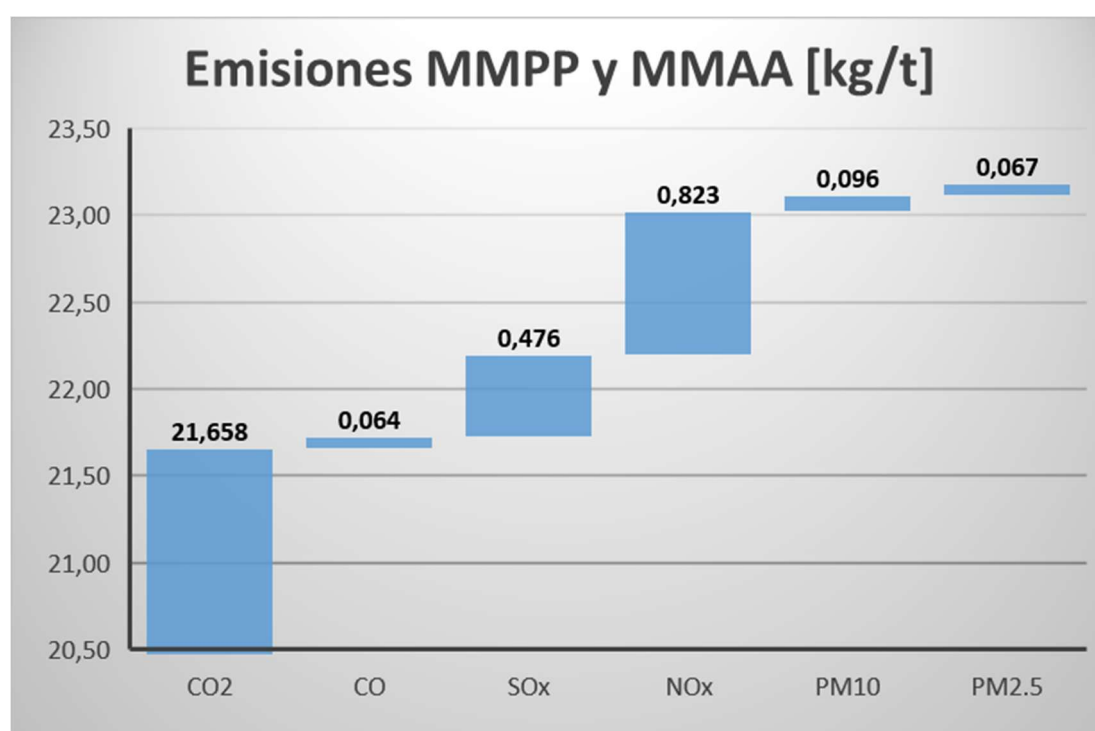
MMPP EMISIONES POR CARGA [g/t]							
FASES:	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	Totales
DESATRAQUE	89,57	1,28	1,56	7,58	0,94	0,91	<b>101,83</b>
MANIOBRAS	2425,2	23,25	176,88	304,90	25,27	24,59	<b>2980,1</b>
SRZ	841,48	2,10	14,14	24,98	2,10	2,05	<b>886,85</b>
CRUCERO	15988,0	36,55	278,12	479,43	39,73	38,67	<b>16860,5</b>
ATRAQUE	71,19	1,02	1,24	6,02	0,75	0,73	<b>80,95</b>
CAR/DESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Totales:	<b>19415,4</b>	<b>64,20</b>	<b>471,94</b>	<b>822,92</b>	<b>68,78</b>	<b>66,95</b>	<b>20910,2</b>

En la tabla 28 se recogen los valores medios de las emisiones contaminantes generadas por los motores auxiliares expresadas en kilogramos por tonelada de carga transportada en un trayecto completo. Se hace además la clasificación en base al combustible que se está utilizando en cada modo de operación.

**TABLA 28. EMISIONES DE MMAA EN GRAMOS DE CONTAMINANTE POR TONELADA TRANSPORTADA**

MMAA EMISIONES POR CARGA TRANSPORTADA [g/t]													
FASES:	CO <sub>2</sub>		CO		SO <sub>x</sub>		NO <sub>x</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>		Total
	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	
DESATR.	128,52	120,98	0,20	0,20	2,25	0,40	2,69	2,54	0,27	0,07	0,27	0,06	<b>258,47</b>
MANIOBR.	678,59	638,80	1,06	1,06	11,88	2,12	14,20	13,42	1,45	0,37	1,41	0,34	<b>1364,7</b>
SRZ	171,36	0,00	0,27	0,00	3,00	0,00	3,59	0,00	0,37	0,00	0,36	0,00	<b>178,94</b>
CRUCERO	169,16	0,00	0,26	0,00	2,96	0,00	3,54	0,00	0,36	0,00	0,35	0,00	<b>176,64</b>
ATRAQUE	128,52	120,98	0,20	0,20	2,25	0,40	2,69	2,54	0,27	0,07	0,27	0,06	<b>258,47</b>
CAR/DESC.	0,00	85,68	0,00	0,13	0,00	1,50	0,00	1,79	0,00	0,18	0,00	0,18	<b>89,47</b>
Totales:	<b>1276,15</b>	<b>966,45</b>	<b>2,00</b>	<b>1,60</b>	<b>22,34</b>	<b>4,43</b>	<b>26,70</b>	<b>20,30</b>	<b>2,72</b>	<b>0,69</b>	<b>2,65</b>	<b>0,64</b>	<b>2326,7</b>
	<b>2242,6</b>		<b>3,597</b>		<b>26,77</b>		<b>47,00</b>		<b>3,413</b>		<b>3,296</b>		

Al expresar las emisiones por intensidad de carga se obtienen ratios con valores más bajos que si se habla de intensidad de personas transportadas o solo de kilogramos de emisiones emitidas a la atmósfera. Para tener una visión más clara, el gráfico 19 muestra el total de emisiones producidas por tonelada de carga, tanto de los motores principales como auxiliares.



**GRÁFICO 19. EMISIONES TOTALES EN KILOGRAMO DE CONTAMINANTE POR TONELADA DE CARGA Y POR TRAYECTO**

Para tener resultados más completos faltaría considerar la distancia navegada durante el trabajo de transporte desarrollado. Cuando se realizan estudios de transporte terrestre o aéreo, los datos siempre suelen expresarse en consumos y emisiones por pasajero o tonelada, por kilómetro que se recorre. En el caso de este estudio, permite aplicar al transporte marítimo estas consideraciones además de poder tener en cuenta las millas náuticas que se recorre en cada navegación y la carga correspondiente.

En las siguientes tablas 29, 30 y 31, tras aplicar las ecuaciones 15 y 16 de la metodología, se muestran los resultados teniendo en cuenta todos los datos comentados anteriormente para que se pueda apreciar el consumo de estos buques tipo Ro-Pax y las emisiones contaminantes que se producen cuando navegan entre los puertos de Algeciras y Tánger.

TABLA 29. CONSUMOS DE COMBUSTIBLE POR PASAJERO TRANSPORTADO Y MILLA NÁUTICA NAVEGADA

CONSUMOS POR PASAJERO Y DISTANCIA NAVEGADA [g/pax·nm]				
FASES DE LA NAVEGACIÓN	MMPP	MMAA		Totales
	RO	RO	MDO	
DESATRAQUE	7,81	8,84	8,71	25,36
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	195,21	46,67	46,01	287,88
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	65,54	13,25	0,00	78,79
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	1131,9	63,92	0,00	1195,8
ATRAQUE	6,24	8,84	8,71	23,79
CARGA/DESCARGA	0,00	0,00	112,34	112,34
Totales:	1,41	0,14	0,18	1,72

El consumo total de combustible residual por pasajero transportado y milla náutica navegada sumaría 4,83 kilogramos frente a 3,52 de combustible destilado cuando el buque se encuentra en puerto realizando las maniobras y las operaciones de carga y descarga.

En el gráfico 20 se representa los diferentes consumos de combustible por cada pasajero y distancia navegada, en cada modo de trabajo del barco a lo largo de un trayecto completo.

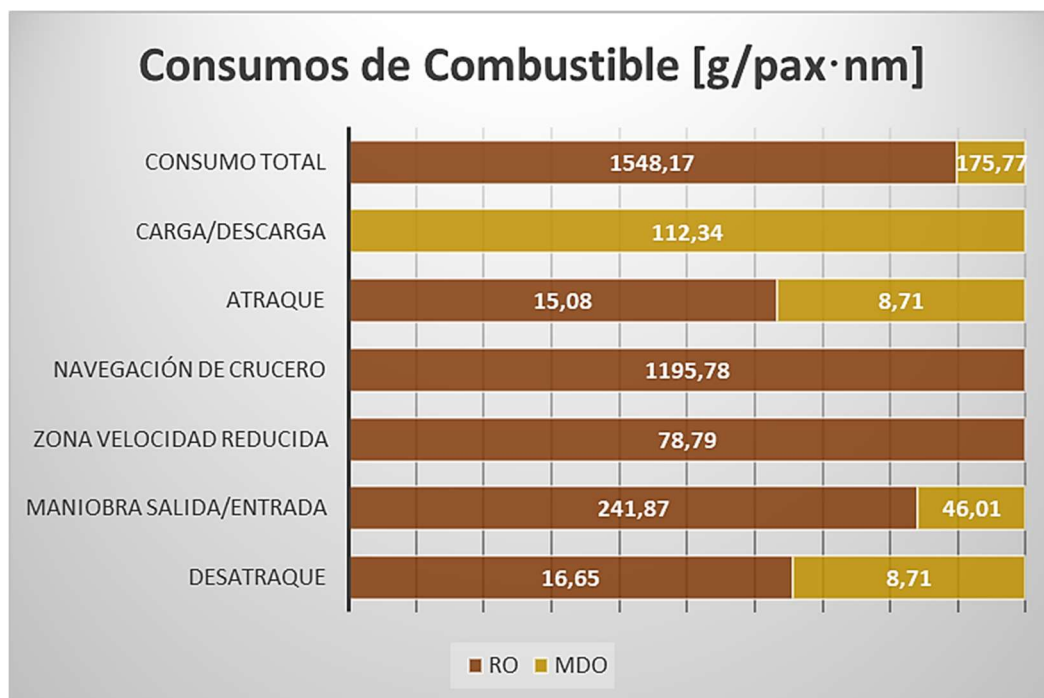


GRÁFICO 20. CONSUMOS TOTALES POR PASAJERO TRANSPORTADO Y MILLA NÁUTICA NAVEGADA



En la tabla 30 se recogen los gramos de contaminantes producidos por la planta propulsora del buque por cada milla náutica que se recorre y por pasajero que se transporta consumiendo combustible residual en cada una de las fases de la navegación.

**TABLA 30. EMISIONES CONTAMINANTES DE LOS MMPP POR CADA PASAJERO TRANSPORTADO Y MILLA NÁUTICA NAVEGADA**

MMPP EMISIONES por PASAJERO y DISTANCIA [g/pax·nm]							
FASES:	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	Totales
DESATRAQUE	19,30	0,28	0,34	1,63	0,20	0,20	<b>21,94</b>
MANIOBRAS	522,61	1,19	9,09	15,67	1,30	1,26	<b>551,13</b>
SRZ	180,35	0,45	3,03	5,35	0,45	0,44	<b>190,07</b>
CRUCERO	3464,3	7,92	60,26	103,88	8,61	8,38	<b>3653,3</b>
ATRAQUE	15,34	0,22	0,27	1,30	0,16	0,16	<b>17,44</b>
CAR/DESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Totales:	<b>4201,89</b>	<b>10,06</b>	<b>72,99</b>	<b>127,84</b>	<b>10,72</b>	<b>10,44</b>	<b>4433,93</b>

Los motores de la planta eléctrica recogen sus datos de emisiones contaminantes en la siguiente tabla 31 diferenciando cada modo de operación y el combustible utilizado. Los resultados por pasajero y distancia navegada quedan reflejados para cada tipo de contaminante.

**TABLA 31. EMISIONES CONTAMINANTES DE LOS MMAA POR CADA PASAJERO TRANSPORTADO Y MILLA NÁUTICA NAVEGADA**

MMAA EMISIONES por PASAJERO y DISTANCIA [g/pax·nm]													
FASES:	CO <sub>2</sub>		CO		SO <sub>x</sub>		NO <sub>x</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>		Total
	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	
DESATR.	27,70	26,07	0,04	0,04	0,48	0,09	0,58	0,55	0,06	0,01	0,06	0,01	55,7
MANIOBR.	146,23	137,66	0,23	0,23	2,56	0,46	3,06	2,89	0,31	0,08	0,30	0,07	294,1
SRZ	36,93	0,00	0,06	0,00	0,65	0,00	0,77	0,00	0,08	0,00	0,08	0,00	38,6
CRUCERO	36,26	0,00	0,06	0,00	0,63	0,00	0,76	0,00	0,08	0,00	0,08	0,00	37,9
ATRAQUE	27,70	26,07	0,04	0,04	0,48	0,09	0,58	0,55	0,06	0,01	0,06	0,01	55,7
CAR/DESC.	0,00	18,46	0,00	0,03	0,00	0,32	0,00	0,39	0,00	0,04	0,00	0,04	19,3
Totales:	274,81	208,26	0,43	0,34	4,81	0,95	5,75	4,38	0,59	0,15	0,57	0,14	501,2
	483.07		0.77		5.77		10.12		0.74		0.71		

En el gráfico 21 se puede observar los kilogramos totales de emisiones procedentes tanto de los motores principales como auxiliares por cada pasajero transportado y por cada milla náutica que se navega.

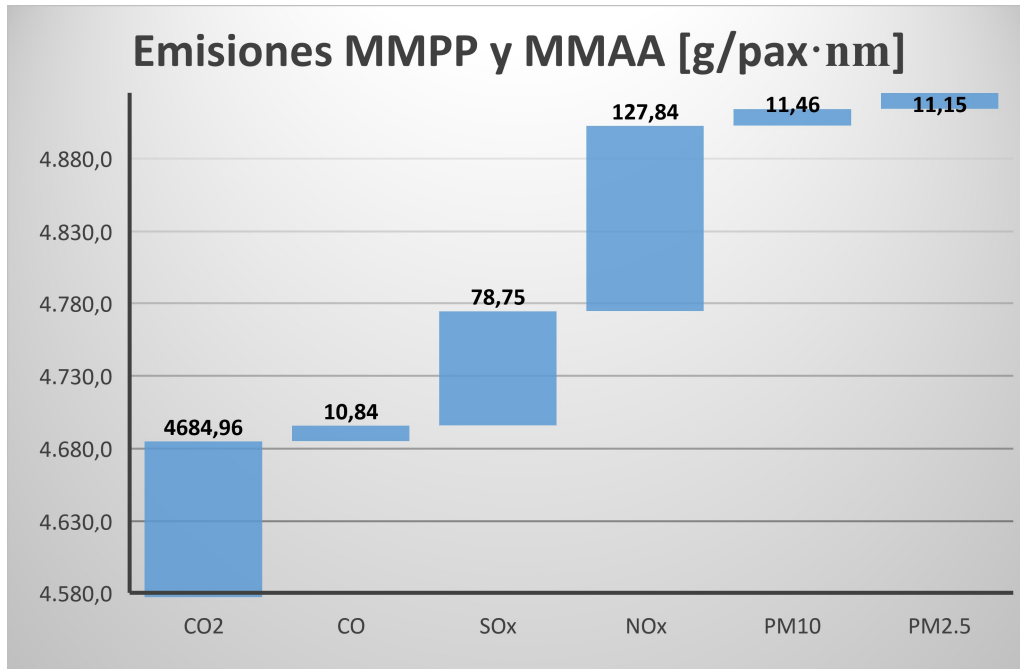


GRÁFICO 21. EMISIONES TOTALES DE MMPP Y MMAA EN KILOGRAMO DE CONTAMINANTE POR PASAJERO Y MILLA NÁUTICA NAVEGADA

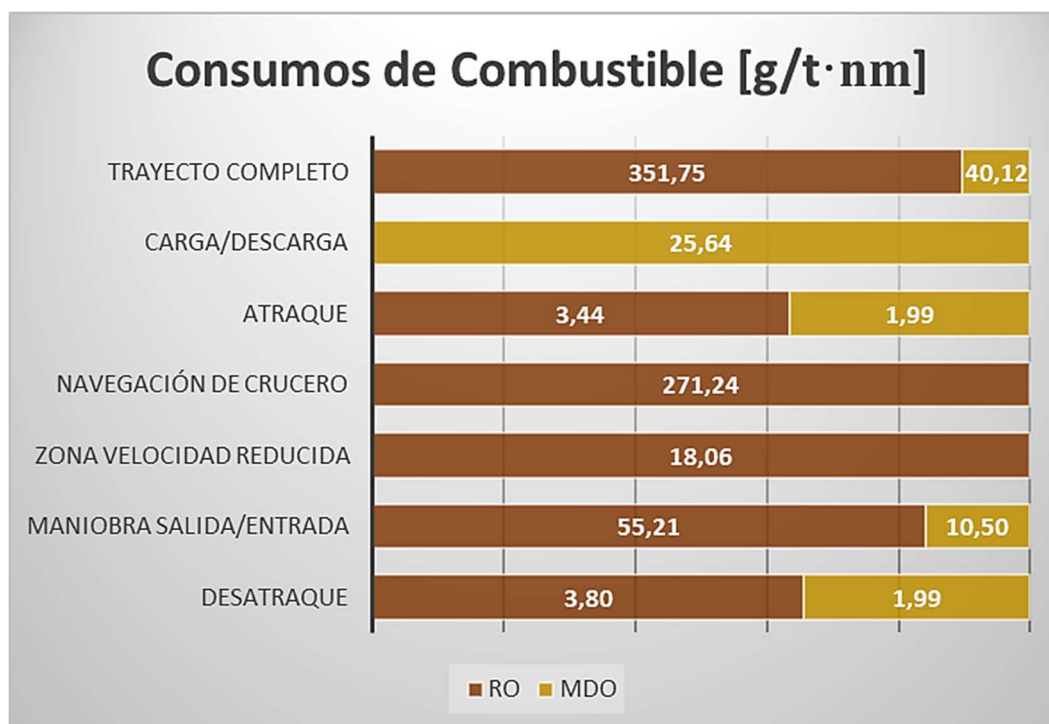
De la misma forma, si atendemos a las toneladas transportadas en cada viaje, podemos representar la energía consumida por cada tonelada transportada y por cada milla náutica navegada por los buques Ro-Pax analizados.

En la siguiente tabla 32 se representan los gramos de combustible que se consumen en cada modo de operación entre los motores principales y los motores diésel-generadores, diferenciando el tipo de combustible utilizado en cada modo por tonelada y milla náutica.

TABLA 32. CONSUMOS DE COMBUSTIBLE TOTALES DE MMPP Y MMAA POR TONELADA TRANSPORTADA Y MILLA NÁUTICA NAVEGADA

CONSUMOS POR CARGA TRANSPORTADA Y DISTANCIA NAVEGADA [g/t·nm]				
FASES DE LA NAVEGACIÓN	MMPP	MMAA		Totales
	RO	RO	MDO	
DESATRAQUE	1,78	2,02	1,99	5,79
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	44,56	10,65	10,50	65,72
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	15,04	3,03	0,00	18,06
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	256,62	14,62	0,00	271,24
ATRAQUE	1,42	2,02	1,99	5,43
CARGA/DESCARGA	0,00	0,00	25,64	25,64
Totales:	319,43	32,33	40,12	391,88

Según los cálculos realizados en base a los datos operacionales de los buques, se estiman unos 351,75 gramos de combustible residual por cada tonelada de carga transportada y milla náutica navegada. De combustible destilado el consumo total por tonelada y distancia navegada sería de 40,12 gramos de MDO.



**GRÁFICO 22. CONSUMOS TOTALES DE COMBUSTIBLE POR TONELADA DE CARGA TRANSPORTADA Y MILLA NÁUTICA NAVEGADA**

Cuando se tiene en consideración la distancia recorrida durante las fases de la operatividad de los buques, observamos como los datos de consumos de combustibles son proporcionales a la energía que se ha generado en cada modo de operación. Se puede apreciar una proporción casi del 90% de combustible RO y 10% de combustible MDO por trayecto realizado. La mayor cantidad de combustible se consume durante las fases de navegación crucero y de velocidad reducida, siendo también las fases de mayor velocidad de buque y por tanto cuando más energía se requiere, como se puede apreciar en el gráfico 22.

En la siguiente tabla se muestran los valores estimados en gramos de cada contaminante de los motores principales por cada tonelada de carga transportada y milla náutica navegada.

**TABLA 33. EMISIONES EN GRAMOS DE CONTAMINANTE DE MMPP POR CADA TONELADA TRANSPORTADA Y MILLA NÁUTICA NAVEGADA**

MMPP EMISIONES por CARGA y DISTANCIA [g/t·nm]							
FASES:	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	Totales
DESATRAQUE	4,406	0,063	0,077	0,373	0,046	0,045	<b>5,01</b>
MANIOBRAS	119,298	0,273	2,075	3,577	0,296	0,289	<b>125,81</b>
SRZ	41,398	0,103	0,696	1,229	0,103	0,101	<b>43,63</b>
CRUCERO	785,292	1,795	13,661	23,548	1,952	1,899	<b>828,15</b>
ATRAQUE	3,502	0,050	0,061	0,296	0,037	0,036	<b>3,98</b>
CAR/DESC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Totales:	<b>953,90</b>	<b>2,28</b>	<b>16,57</b>	<b>29,02</b>	<b>2,43</b>	<b>2,37</b>	<b>1006,58</b>

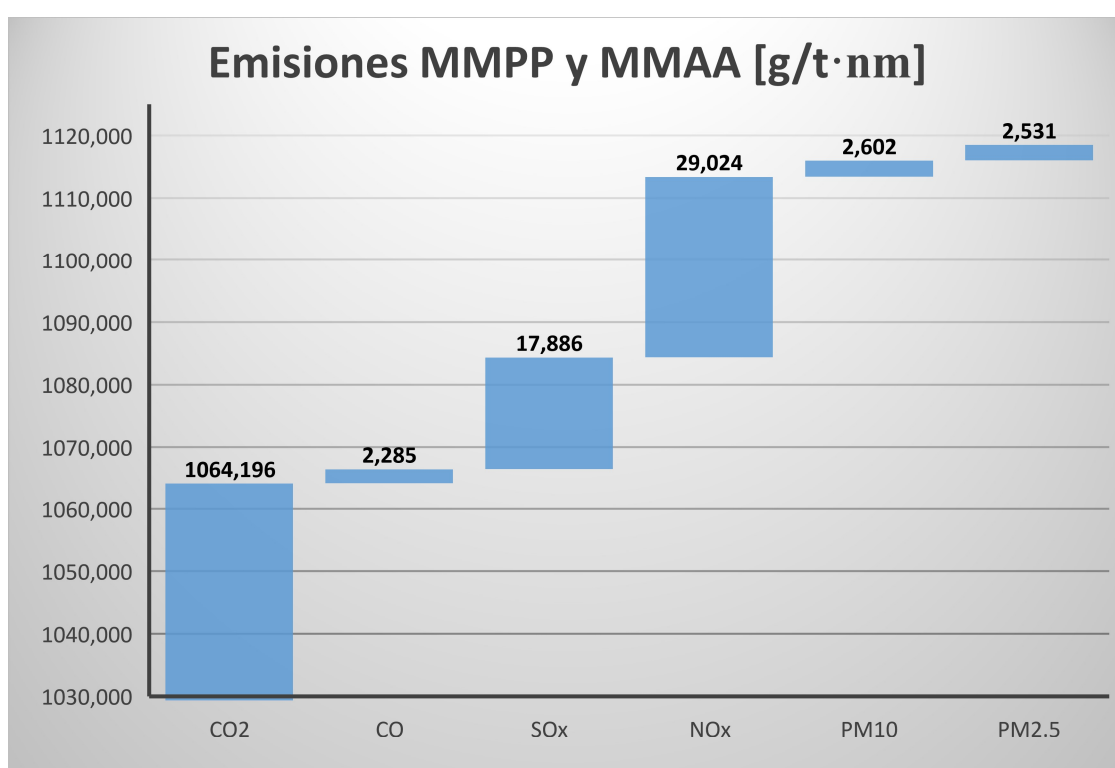
El contaminante con mayor presencia sigue siendo el dióxido de carbono con un 94,7% de las emisiones totales de estos motores. De estas emisiones totales de dióxido de carbono, la mayor cantidad de CO<sub>2</sub> generado corresponde a la etapa de navegación crucero con un 82,3% seguida de la fase maniobras con un 12,5% del total de emisiones de CO<sub>2</sub>.

En la tabla 34 se muestran los valores gramos de contaminante por tonelada y milla náutica navegada de los motores auxiliares en cada modo de operación y según el combustible utilizado.

**TABLA 34. EMISIONES EN GRAMOS DE CONTAMINANTE DE MMAA POR CADA TONELADA TRANSPORTADA Y MILLA NÁUTICA NAVEGADA**

MMAA EMISIONES por CARGA y DISTANCIA [g/t·nm]													
FASES:	CO <sub>2</sub>		CO		SO <sub>x</sub>		NO <sub>x</sub>		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>		Total
	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	RO	MDO	
DESATR.	6,322	5,951	0,010	0,010	0,111	0,020	0,132	0,125	0,013	0,003	0,013	0,003	<b>12,71</b>
MANIOB.	33,381	31,423	0,052	0,052	0,584	0,105	0,698	0,660	0,071	0,018	0,069	0,017	<b>67,13</b>
SRZ	8,430	0,00	0,013	0,00	0,148	0,00	0,176	0,00	0,018	0,00	0,018	0,00	<b>8,80</b>
CRUCERO	8,305	0,00	0,013	0,00	0,145	0,00	0,174	0,00	0,018	0,00	0,017	0,00	<b>8,67</b>
ATRAQUE	6,322	5,951	0,010	0,010	0,111	0,020	0,132	0,125	0,013	0,003	0,013	0,003	<b>12,71</b>
CAR/DES	0,00	4,215	0,00	0,007	0,00	0,074	0,00	0,088	0,00	0,009	0,00	0,009	<b>4,40</b>
Totales:	<b>62,76</b>	<b>47,54</b>	<b>0,098</b>	<b>0,079</b>	<b>1,099</b>	<b>0,218</b>	<b>1,313</b>	<b>0,999</b>	<b>0,134</b>	<b>0,034</b>	<b>0,130</b>	<b>0,032</b>	<b>114,44</b>
	<b>110,30</b>		<b>0,177</b>		<b>1,317</b>		<b>2,312</b>		<b>0,168</b>		<b>0,162</b>		

Según los datos analizados y la metodología aplicada se obtiene que un buque Ro-Pax como los utilizados en este estudio emitiría un total de 1,586 kilogramos de emisiones contaminantes por cada tonelada y milla náutica navegada. El desglose de estos datos se puede apreciar en el gráfico 23 donde encontramos los gramos de cada emisión contaminante analizada por tonelada y milla náutica. Se puede observar como el CO<sub>2</sub> con 1064,2 g/t·nm abarca la mayor parte de los contaminantes emitidos seguido con valores más reducidos por los NO<sub>x</sub> con 29 g/t·nm y los SO<sub>x</sub> con 17,9 g/t·nm. El monóxido de carbono y las partículas generan valores muy similares en torno a 2,5 gramos de contaminante por cada tonelada transportada y milla náutica navegada.



**GRÁFICO 23. EMISIONES TOTALES DE MMPP Y MMAA EN KILOGRAMO DE CONTAMINANTE POR TONELADA TRANSPORTADA Y MILLA NÁUTICA NAVEGADA**



## **CAPÍTULO 6**

### DISCUSIÓN

Actualmente no existe uniformidad de criterios a la hora de realizar una estimación de las emisiones contaminantes y los consumos energéticos del transporte marítimo, pero se han estudiado las metodologías más relevantes y se ha desarrollado un modelo que minimiza las incertidumbres y permite calcular las emisiones contaminantes y los consumos de combustible en función de la intensidad de trabajo realizado al tener en cuenta la carga y el pasaje que se transporta.

Este estudio de tesis doctoral ha sido posible gracias a que la metodología bottom-up utilizada se fundamenta en los propios datos suministrados por los buques a partir de sus bases de datos de a bordo y de los informes diarios tanto del personal encargado de la sección de máquinas como de los registros del personal de las secciones de puente y cubierta de cada buque.

Al introducir en los cálculos el pasaje transportado, la carga (vehículos y demás carga rodada en el caso particular de los buques tipo Ro-Pax) y la distancia que se recorre, obtenemos una visión más realista de la intensidad del trabajo real realizado por los barcos



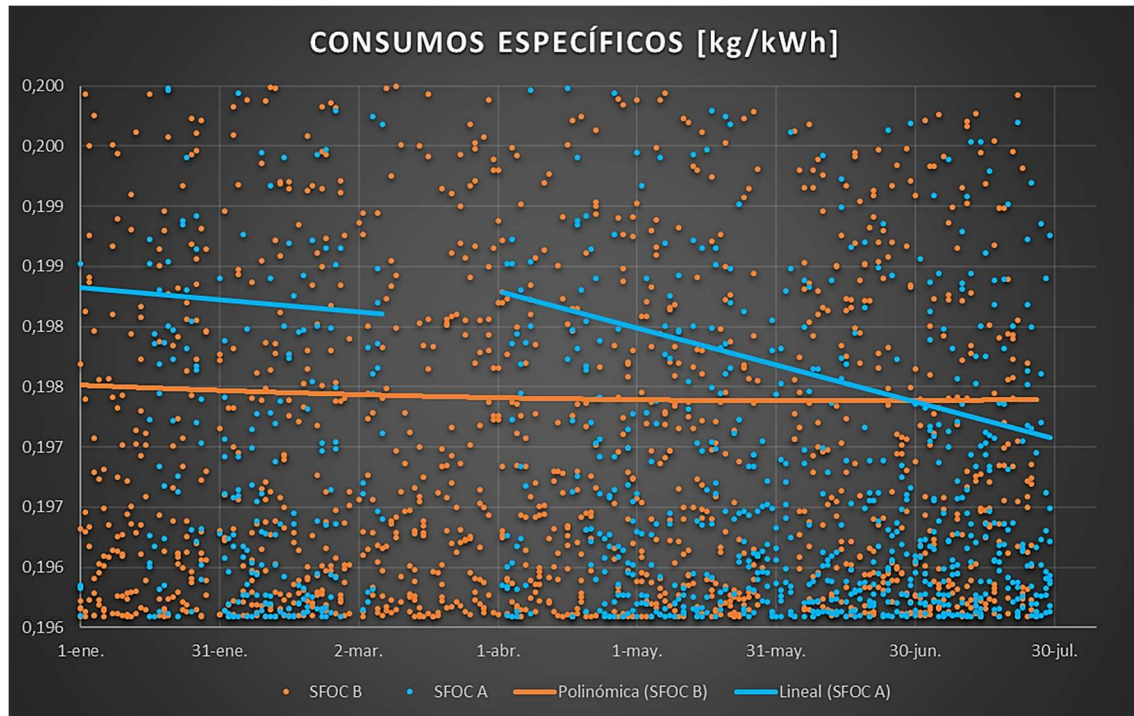
sometidos a estudio, así como una información más precisa sobre la eficiencia con la que desarrollan su operativa.

El hecho de considerar la variación de los consumos específicos en función del factor de carga que se está desarrollando en cada momento, el tipo de motor y el combustible que se está utilizando, marca una diferencia notable entre el modelo utilizado frente a otras metodologías que asumen este parámetro como constante como es el caso de las metodologías de la EPA (2000) y MAN Diesel & Turbo (2012), siendo este parametro un dato fundamental a la hora de realizar el cálculo de las estimaciones. En este caso, tanto la propuesta de la IMO en su tercer estudio sobre gases de efecto invernadero (Smith et al. 2014), como Jalkanen et al. (2009) coinciden en la consideración de que el SFOC se estime en función de la operatividad de los motores y el buque sometido a estudio.

Si analizamos el comportamiento de los consumos específicos de los motores propulsores de ambos buques en nuestro caso de estudio particular, podemos apreciar como el buque A refleja una disminución a lo largo del periodo estudiado en sus valores a partir del mes de abril.

Esto es debido a que, durante la parada técnica realizada en marzo, a este buque se le aplicó un tratamiento de pintura de casco con base de siliconas y tratamiento anti-incrustante.

Este tratamiento es una de las tendencias que están adoptando algunos armadores para poder optimizar la operatividad de sus barcos. Este tipo de productos disminuye la resistencia al desplazamiento del barco en el agua y permite minimizar y ralentizar el ensuciamiento del casco gracias al uso de estos “antifoulings” de última generación libres de biocidas y con base 100% siliconas de superficie orgánica activa y polímeros tensoactivos controlados (CSP). Actualmente siguen teniendo un coste elevado frente a tratamientos y pinturas de casco tradicionales, pero ofrecen prestaciones cada vez mejores y de manera respetuosa con el medio marino.

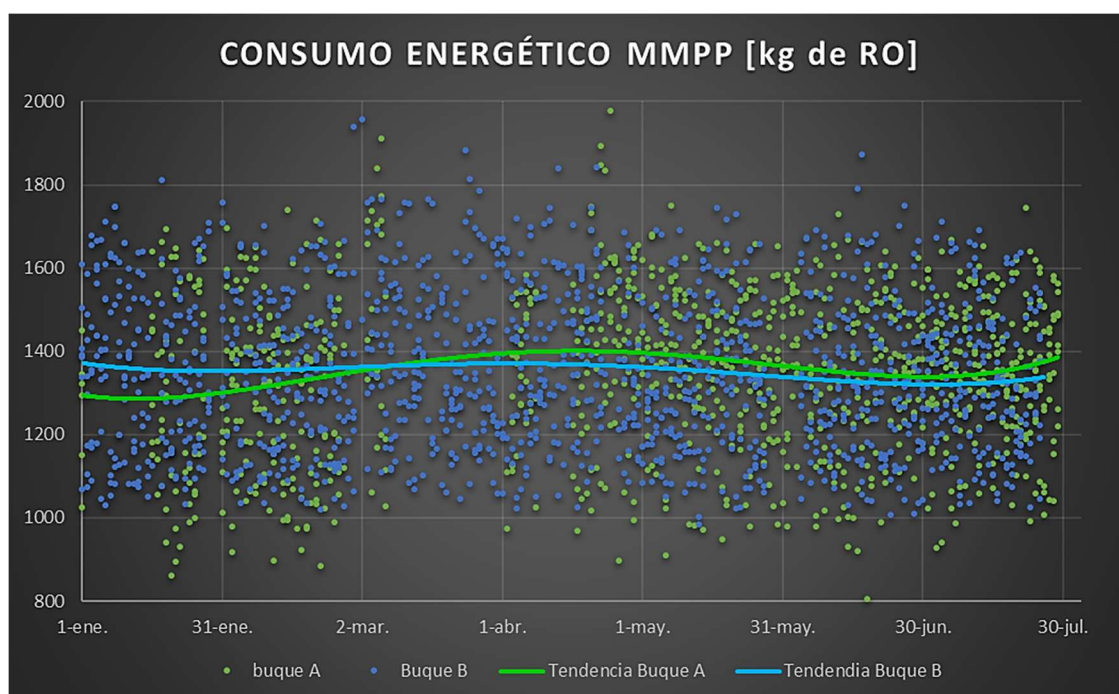


**GRÁFICO 24. SFOC DE MMPP EN MODO DE NAVEGACIÓN-CRUCERO DURANTE EL PERIODO DE ESTIUO DE AMBOS BUQUES**

Como consecuencia de ello, se puede apreciar claramente como su resistencia al desplazamiento mejoró y por lo tanto requiere menor potencia para navegar a la misma velocidad, repercutiendo en los factores de carga de los motores y consecuentemente en sus consumos específicos, como se aprecia el gráfico 24.

La metodología aplicada en este estudio permite comprobar que efectivamente la opción adoptada para el tratamiento del casco de este buque es una elección bastante acertada y que debería valorarse como posibilidad de mejora a otros buques de la compañía. El uso de esta metodología desarrollada en esta tesis doctoral se puede utilizar como una eficaz herramienta para estudiar la situación actual de los buques permitiendo simular distintos escenarios posibles y obtener resultados muy cercanos a la realidad contemplando la recomendación de mejora de EEOI mediante la incorporación de este tipo de medidas dentro del SEEMP avanzando en el camino hacia la reducción de emisiones marcado por la Organización Marítima Internacional.

Dependiendo de cómo se realicen las estimaciones de consumo energético podemos tener datos que no reflejen realmente la intensidad de trabajo que se está realizando, ni tampoco la eficiencia energética con la que se está desarrollando. En el gráfico 25 se ha representado el consumo energético en kilogramos de combustible consumido por las plantas propulsoras de ambos buques durante las etapas de navegación en el periodo de estudio. Evaluando estos consumos en las unidades comentadas, se aprecia que sus valores medios siguen unas líneas de tendencia que se mantienen prácticamente constantes a lo largo de todo el periodo de estudio.



**GRÁFICO 25. CONSUMOS ENERGÉTICOS DE MMPP EN FASE DE NAVEGACIÓN POR TRAYECTO DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO**

La realidad es que dependiendo de la cantidad de carga que se transporte, se estará realizando un trabajo más o menos eficiente. Esto no se ve reflejado en los datos anteriores al dar el consumo energético en kilogramos de combustible consumido sin tener en cuenta la referencia de los pasajeros o la carga que se transporta en cada trayecto. La distancia que se ha navegado desde el puerto de origen hasta el de destino también es otro dato importante a tener en cuenta a la hora de expresar los resultados del trabajo desarrollado por el mismo motivo que se acaba de comentar. En nuestro caso de estudio, los buques siempre transitan entre los mismos puertos y por ello la distancia navegada

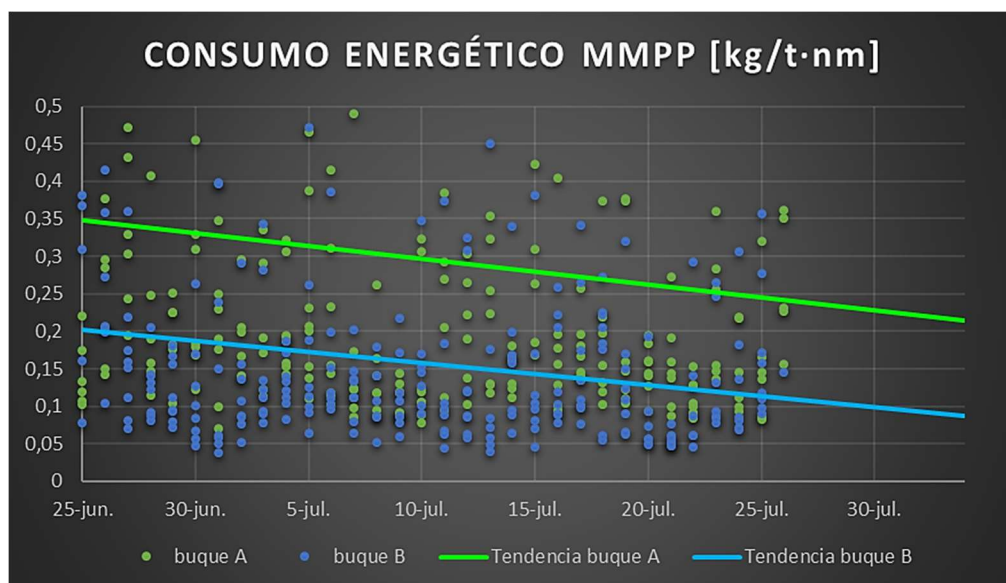
prácticamente no sufre variaciones, pero es un parámetro fundamental si se quisiera analizar los resultados frente a otras zonas marítimas u otros medios de transporte. Al representarse el consumo en kilogramo de combustible, prácticamente no se aprecian variaciones significativas durante las navegaciones del periodo estudiado.

Por el contrario, si expresamos el consumo de la planta propulsora de los buques durante la navegación en función del pasaje embarcado en cada viaje, tendríamos una representación más exacta de la eficiencia con la que se está consumiendo el combustible de la planta propulsora por pasajero transportado.

Otra opción para conocer con mayor precisión la eficiencia con la que se está consumiendo la energía del combustible sería expresarlo en función de la carga transportada en cada trayecto y teniendo en cuenta la distancia navegada en millas náuticas. Al desglosar el resultado estimado en función de la distancia que se ha transportado la carga, estos resultados podrían ser comparables con otras navegaciones entre puertos diferentes y se podría realizar valoraciones entre distintos buques, compañías, épocas estacionales, etc.

En el gráfico 26, para una visión más clara de lo que se está comentando, se ha representado el consumo energético de ambos buques durante el último periodo de estudio entre los meses de junio y julio, coincidiendo con el inicio de la OPE.

En esta ocasión se han expresado los resultados de consumo energético en kilogramo de combustible por tonelada de carga transportada y por milla náutica navegada, apreciándose como la tendencia del consumo energético es decreciente a medida que se incrementa la carga transportada, por lo que se puede comprobar claramente que a mayor intensidad de carga se aumenta la eficiencia energética de los buques, ya que el consumo de energía por tonelada de carga y por distancia navegada disminuye cuanto mayor es el índice carga de los buques.



**GRÁFICO 26. CONSUMO ENERGÉTICO DE MMPP EN NAVEGACIÓN DURANTE EL INICIO DE LA OPE EN KILOGRAMOS DE RO POR TONELADA Y MILLA NÁUTICA**

Uno de los beneficios de realizar este tipo de estudios sobre los buques que están operando es la posibilidad de analizar aquellos factores que pueden mejorar su índice de operación de eficiencia energética. Hemos comentado como el estado del casco influye en dicho índice tras la aplicación de una patente que reduce su resistencia al desplazamiento mejorando los consumos y consecuentemente reduciendo las emisiones.

Otro factor que también repercute de forma clara es la intensidad del trabajo realizado durante la navegación. Cuanta más carga se transporta, tanto pasajeros como vehículos, mayor rendimiento se le estará sacando al combustible que se está consumiendo. Por este motivo, una política que podría mejorar la eficiencia energética de estos buques sería perseguir el mayor nivel de ocupación tanto de pasaje como de carga rodada en cada trayecto. Aunque hay que tener en cuenta que esto no es algo que esté a disposición de las empresas navieras ya que, su interés por perseguir este punto tiene varios beneficios además del de la mejor en eficiencia, a mayor carga mayores beneficios económicos.

El nivel de intensidad de carga suele venir condicionado por la competencia entre las diferentes navieras que operan la misma línea, los precios de mercado de estas navegaciones frente a otras alternativas de transporte, junto con la época estacional, la cual está íntimamente relacionada con los periodos vacacionales y otros eventos que promueven los desplazamientos entre los puertos de estudio.

Sin embargo, las compañías navieras estudian las rutas y la frecuencia de tránsito de los barcos, pudiéndose en este caso influir en la intensidad de carga de un buque organizando las rutas para que un número excesivos de buques no operen la misma línea si la demanda en esos periodos es demasiado baja para ese número de barcos operando esa ruta.

Dentro del caso particular de la zona de estudio elegida para esta tesis, esta práctica la llevan a cabo muchas de las navieras que trabajan en la zona marítima del Estrecho de Gibraltar, incrementando el número de buques y el número de trayectos durante la OPE y reduciendo estos servicios el resto del año. Normalmente esta optimización de los recursos suele buscar un objetivo económico, a pesar de llevar asociada colateralmente un aumento en la eficiencia energética y una reducción de las emisiones contaminantes por la intensidad de trabajo de transporte realizado como consecuencia de su mejora operacional.

Que este punto se contemplara al mismo nivel de importancia que el beneficio económico directo derivado de la actividad de los buques, impulsaría la mejora en eficiencia energética de los barcos que navegan actualmente entre esos puertos. Esto es un claro indicativo de la utilidad e importancia que tiene el desarrollo de la metodología empleada en este trabajo de tesis doctoral que puede usarse como herramienta de control y como base de estudio para los armadores y empresas navieras responsables de optimizar sus líneas comerciales ayudando a valorar las opciones para reducir las emisiones contaminantes.

Si analizamos una muestra de los trayectos con mayor intensidad de carga frente a otra muestra de las navegaciones con la intensidad de carga más baja, podemos obtener una idea del margen de mejora tanto en consumos como en emisiones en función del factor de aprovechamiento del transporte en base a la carga y los pasajeros transportados.

Centrándonos en la intensidad de trabajo realizado por pasajero transportado, podemos analizar a modo de ejemplo una muestra de los trayectos realizados por uno de los buques de estudio donde el índice ocupacional del buque es bajo, asumiendo los viajes cuya carga de pasaje esté por debajo del 10% de capacidad total de buque sin tener en cuenta la tripulación de este.

En la tabla 35 se ha representado el consumo de combustible estimado para una situación de baja intensidad de pasajeros transportados por distancia navegada en gramos de combustible por pasajero y milla náutica.

**TABLA 35. CONSUMOS EN SITUACIÓN DE BAJA INTENSIDAD DE PASAJEROS TRANSPORTADOS EN GRAMOS DE COMBUSTIBLE POR PASAJERO Y MILLA NÁUTICA**

<b>CONSUMOS POR PASAJERO Y DISTANCIA NAVEGADA</b> <b>(SITUACIÓN DE BAJA CARGA DE PASAJEROS) [g/pax·nm]</b>				
FASES DE LA NAVEGACIÓN	MMPP	MMAA		Totales
	RO	RO	MDO	
DESATRAQUE	10,1	11,4	11,3	<b>32,8</b>
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	252,7	60,4	59,6	<b>372,7</b>
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	41,7	17,2	0	<b>58,9</b>
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	1467,1	83,4	0	<b>1550,5</b>
ATRAQUE	8	11,4	11,3	<b>30,7</b>
CARGA/DESCARGA	0	0	145,5	<b>145,5</b>
<b>Totales:</b>	<b>1779,6</b>	<b>183,8</b>	<b>227,7</b>	<b>2191,1</b>

Siguiendo la metodología desarrollada en esta tesis, se obtienen los datos clasificados por cada etapa de la navegación que se realiza y en función del tipo de combustible utilizada por cada motor en cada modo.

Por otro lado, se han recopilado también los datos del mismo buque cuando la intensidad de pasajeros transportados era alta, considerando los trayectos donde el número de pasajeros transportados superaba el 80% de la capacidad de carga del buque sin contabilizar a la tripulación.

Estos datos se recogen en la siguiente tabla 36 donde se representan los valores de consumo de combustible correspondientes a situación de alta intensidad de pasajeros transportados en gramos de cada tipo de combustible consumido por pasajero y milla náutica navegada.

**TABLA 36. CONSUMOS EN SITUACIÓN DE ALTA INTENSIDAD DE PASAJEROS TRANSPORTADOS EN GRAMOS DE COMBUSTIBLE POR PASAJERO Y MILLA NÁUTICA**

<b>CONSUMOS POR PASAJERO Y DISTANCIA NAVEGADA</b> <b>(SITUACIÓN DE ALTA CARGA DE PASAJEROS) [g/pax·nm]</b>				
FASES DE LA NAVEGACIÓN	MMPP	MMAA		Totales
	RO	RO	MDO	
DESATRAQUE	0,552	0,624	0,615	<b>1,79</b>
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	13,78	3,294	3,248	<b>20,32</b>
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	2,282	0,936	0	<b>3,22</b>
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	80,67	4,644	0	<b>85,31</b>
ATRAQUE	0,262	0,624	0,615	<b>1,50</b>
CARGA/DESCARGA	0	0	7,930	<b>7,93</b>
<b>Totales:</b>	<b>97,55</b>	<b>10,12</b>	<b>12,41</b>	<b>120,08</b>

Como se puede observar en las tablas anteriores, el consumo de combustible por pasajero que se transporta varía notablemente entre una situación donde el buque realiza un trayecto con más del 80% de la capacidad de pasaje embarcado frente a otro trayecto donde los pasajeros transportados no llegan al 10% de la capacidad de ocupación, llegando a diferir en 1.855,73 gramos de combustible residual y 215,29 gramos de MDO por cada pasajero transportado y por milla náutica navegada. En términos generales de combustible consumido se puede disminuir el consumo de combustible por cada pasajero en más de un 95% en las navegaciones realizadas por el buque de estudio durante el periodo analizado cuando el índice de ocupación es alto, en esta condición de ejemplo, aquellos trayectos con más del 80% de la capacidad.

Si atendemos a las emisiones contaminantes producidas en ambas situaciones podemos apreciar que también se producen variaciones considerables entre un alto índice de ocupación por trayecto y uno bajo, a pesar de que estos buques tipo Ro-pax no basan su actividad exclusivamente en el transporte de pasajeros como ya se ha comentado en apartados anteriores de este trabajo.

La tabla 37 corresponde a las emisiones generadas por los MMPP y MMAA en condiciones de baja intensidad de pasajeros embarcados. En ella se muestran los gramos de cada emisión contaminante por pasajero transportado y por milla náutica navegada que se produce en cada fase de navegación cuando el buque opera en situación de bajo índice de carga de pasajeros transportados.



**TABLA 37. EMISIONES DE MMPP Y MMAA EN SITUACIÓN DE BAJA INTENSIDAD DE PASAJEROS TRANSPORTADOS EN GRAMOS DE CONTAMINANTE POR PASAJERO Y MILLA NÁUTICA**

<b>EMISIONES MMPP y MMAA por PASAJERO y DISTANCIA (SITUACIÓN DE BAJA CARGA DE PASAJEROS) [g/pax·nm]</b>							
<b>FASES:</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>SO<sub>x</sub></b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>PM<sub>10</sub></b>	<b>PM<sub>2.5</sub></b>	<b>Totales</b>
DESATRAQUE	94,66	0,51	1,11	3,51	0,40	0,29	<b>100,48</b>
MANIOBRAS	1044,24	2,09	15,69	28,01	2,21	2,08	<b>1094,32</b>
SRZ	162,51	0,37	2,74	4,40	0,40	0,40	<b>170,82</b>
CRUCERO	4536,37	10,27	78,94	135,60	11,20	10,90	<b>4783,28</b>
ATRAQUE	89,52	0,41	1,04	3,16	0,30	0,29	<b>94,72</b>
CAR/DESC	23,91	0,04	0,42	0,50	0,05	0,05	<b>24,96</b>
<b>Totales:</b>	<b>5951,20</b>	<b>13,70</b>	<b>99,94</b>	<b>175,17</b>	<b>14,55</b>	<b>14,02</b>	<b>6268,58</b>

Las emisiones correspondientes a la situación de alta intensidad de pasajeros transportados se representan en la tabla 38. En ella se aprecian los valores de cada emisión contaminante producida por el buque en gramos por pasajero y milla náutica en esta condición de alto índice de ocupación de pasaje.

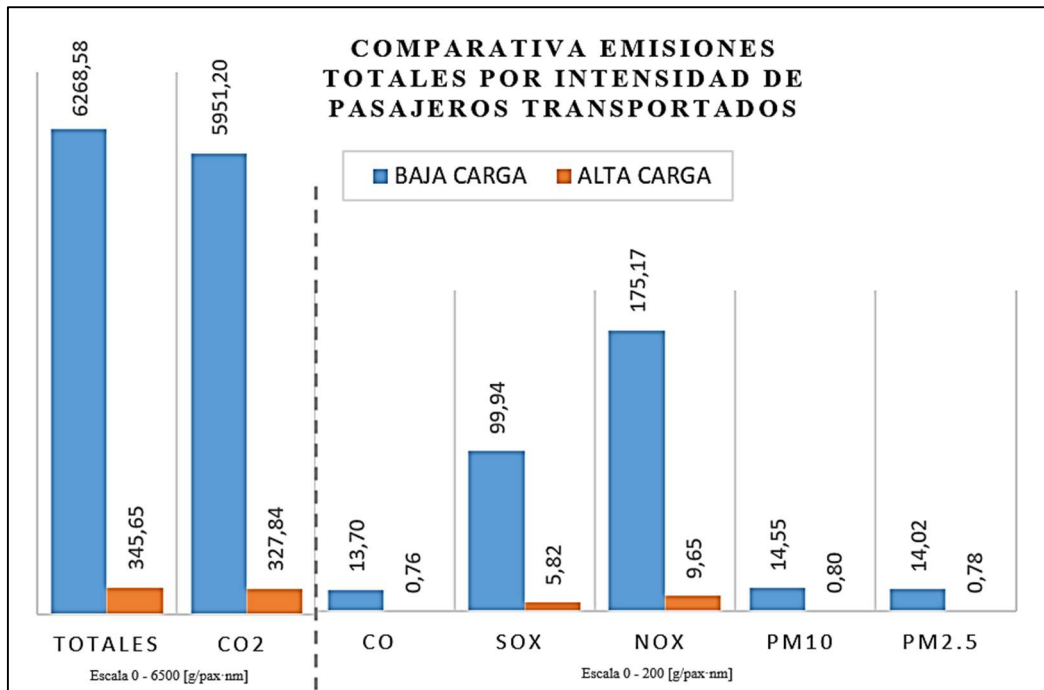
**TABLA 38. EMISIONES DE MMPP Y MMAA EN SITUACIÓN DE ALTA INTENSIDAD DE PASAJEROS TRANSPORTADOS EN GRAMOS DE CONTAMINANTE POR PASAJERO Y MILLA NÁUTICA**

<b>EMISIONES MMPP y MMAA por PASAJERO y DISTANCIA (SITUACIÓN DE ALTA CARGA DE PASAJEROS) [g/pax·nm]</b>							
<b>FASES:</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>SO<sub>x</sub></b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>PM<sub>10</sub></b>	<b>PM<sub>2.5</sub></b>	<b>Totales</b>
DESATRAQUE	5,16	0,03	0,37	0,19	0,02	0,02	<b>5,79</b>
MANIOBRAS	56,93	0,12	0,85	1,53	0,12	0,12	<b>59,67</b>
SRZ	8,88	0,02	0,15	0,24	0,02	0,02	<b>9,33</b>
CRUCERO	250,68	0,57	4,36	7,49	0,62	0,61	<b>264,34</b>
ATRAQUE	4,88	0,02	0,06	0,17	0,02	0,02	<b>5,16</b>
CAR/DESC	1,30	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00	<b>1,36</b>
<b>Totales:</b>	<b>327,84</b>	<b>0,76</b>	<b>5,82</b>	<b>9,65</b>	<b>0,80</b>	<b>0,78</b>	<b>345,65</b>

En función de los datos de emisiones producidas en ambas condiciones de navegación se puede observar que los gramos de emisiones por pasajero y milla náutica disminuyen considerablemente cuando el número de pasajeros supera el 80% de la capacidad de carga del buque.

Una visión más ilustrativa la podemos obtener en el gráfico 27 donde se representan las emisiones totales generadas por el buque en gramos por pasajero y milla

náutica, comparando las navegaciones con menos del 10% de la capacidad de pasajeros embarcados frente a aquellas en las que se ha navegado con más del 80% de la capacidad de embarque.



**GRÁFICO 27. COMPARATIVA DE EMISIONES TOTALES EN SITUACIÓN DE ALTA Y BAJA INTENSIDAD DE PASAJEROS TRNSPORTADOS EN GRAMOS DE CONTAMINANTE POR PASAJERO Y MILLA NÁUTICA**

De las emisiones totales, como es sabido, el dióxido de carbono es el contaminante que se produce en mayor cantidad frente al resto de emisiones estimadas, representado en esta comparativa, casi un 95% del total de emisiones que se generan. Para una apreciar mejor la comparativa entre los distintos contaminantes, en el anterior gráfico 27 se han representado con una escala diferente las emisiones totales y de dióxido de carbono respecto del resto de emisiones. En este análisis concreto y para este buque en particular, se reducen las emisiones de dióxido de carbono de 5.951,2 gramos por pasajero y milla náutica a 327,8 gramos por pasajero y milla náutica. Estos datos ofrecen una información muy importante a tener en cuenta a la hora de realizar estudios para la planificación de la actividad de los buques que transitan en esta zona marítima, así como a la hora de trabajar en la mejora de su EEOI, avanzando en la dirección de las recomendaciones dadas por la Organización Marítima Internacional para alcanzar los objetivos medioambientales marcados con vista a los próximos años.

Si se realiza el mismo ejercicio centrando nuestra atención en la intensidad de carga transportada, entendiendo como tal las toneladas correspondientes a pasaje y carga rodada, podemos apreciar que los resultados que se obtienen son aún más representativos.

Las navegaciones con mayor índice de carga transportada realizadas por el buque sometido a estudio durante el periodo de tiempo analizado, se encuentran comprendidas en un rango de entre el 70% y el 73% de la situación de carga máxima según los libros de estabilidad del buque, por lo que se ha considerado como condición de alta carga para este caso concreto, aquellos tránsitos en los que se transporte más de 1.679 toneladas (72% de la máxima carga).

La situación de baja carga se aplicará a aquellas navegaciones en las que las toneladas transportada sean inferior al 10% de la capacidad total de carga máxima según los libros de estabilidad del buque, analizando aquellos trayectos en los que se transporten menos de 234 toneladas por viaje.

En la tabla 39 se representan el consumo energético del buque cuando navega en situación de baja carga transportada. En dicha tabla se muestran los gramos de combustible por cada tonelada embarcada y milla náutica navegada, desglosado por cada modo de navegación y especificando el combustible utilizada en cada fase tanto por motores principales como por motores auxiliares.

**TABLA 39. CONSUMOS EN SITUACIÓN DE BAJA INTENSIDAD DE CARGA TRANSPORTADA EN GRAMOS DE COMBUSTIBLE POR TONELADA Y MILLA NÁUTICA**

<b>CONSUMOS POR TONELADA Y DISTANCIA NAVEGADA</b> <b>(SITUACIÓN DE BAJA CARGA TRANSPORTADA) [g/t·nm]</b>				
FASES DE LA NAVEGACIÓN	MMPP	MMAA		Totales
	RO	RO	MDO	
DESATRAQUE	3,9	4,4	4,3	<b>12,5</b>
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	96,4	23,0	22,7	<b>142,1</b>
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	15,9	6,5	0,0	<b>22,5</b>
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	568,2	32,1	0,0	<b>600,4</b>
ATRAQUE	3,1	4,4	4,3	<b>11,7</b>
CARGA/DESCARGA	0,0	0,0	55,5	<b>55,5</b>
<b>Totales:</b>	<b>687,5</b>	<b>70,4</b>	<b>86,8</b>	<b>844,7</b>

Si estudiamos los trayectos realizados por el mismo buque en navegaciones con alto índice de carga transportada, se obtienen los datos recogidos en la tabla 40 referentes al consumo de combustible por tonelada y milla náutica navegada generado a partir de las navegaciones donde la carga transportada es superior al 70% de la capacidad total.

**TABLA 40. CONSUMOS EN SITUACIÓN DE ALTA INTENSIDAD DE CARGA TRANSPORTADA EN GRAMOS DE COMBUSTIBLE POR TONELADA Y MILLA NÁUTICA**

<b>CONSUMOS POR TONELADA Y DISTANCIA NAVEGADA (SITUACIÓN DE ALTA CARGA TRANSPORTADA) [g/t·nm]</b>				
<b>FASES DE LA NAVEGACIÓN</b>	<b>MMPP</b>	<b>MMAA</b>		<b>Totales</b>
	<b>RO</b>	<b>RO</b>	<b>MDO</b>	
DESATRAQUE	0,26	0,30	0,29	<b>0,86</b>
MANIOBRA SALIDA/ENTRADA	6,59	1,58	1,55	<b>9,72</b>
ZONA VELOCIDAD REDUCIDA	1,08	0,45	0,00	<b>1,53</b>
NAVEGACIÓN DE CRUCERO	34,94	2,25	0,00	<b>37,19</b>
ATRAQUE	0,21	0,30	0,29	<b>0,80</b>
CARGA/DESCARGA	0,00	0,00	3,79	<b>3,79</b>
<b>Totales:</b>	<b>43,09</b>	<b>4,87</b>	<b>5,94</b>	<b>53,89</b>

La cantidad de combustible consumido cuando el buque navega en condiciones de alta intensidad de carga es de 53,9 gramos de combustible por cada tonelada y milla náutica frente a los 544,7 gramos por tonelada y milla náutica de las navegaciones en baja carga transportada. Podemos decir que cuando el buque navega con un alto índice de carga reduce los consumos por tonelada y milla en más de 15 veces respecto a las navegaciones en las que se tiene un bajo índice de carga transportada.

El consumo energético representado por intensidad de carga transportada ofrece valores más bajos que si se expresa en base a los pasajeros transportados siendo un indicador de trabajo realizado más acertado para este tipo de buques ya que no basan su actividad exclusivamente en el transporte de pasajeros, sino que transportan una carga mixta de pasajeros y carga rodada. Los buques que se dedican únicamente al transporte de pasajeros pueden llegar a tener índices de ocupación más altos y obtener consumos por pasajero transportado más bajos cuando navegan en condición de alta carga de pasaje transportado.

En la siguiente tabla 41 se muestran los valores de emisiones contaminantes producidas por el buque cuando navega en condición de baja carga en gramos de cada tipo de contaminante por tonelada transportada y milla náutica navegada.

**TABLA 41. EMISIONES DE MMPP Y MMAA EN SITUACIÓN DE BAJA INTENSIDAD DE CARGA TRANSPORTADA EN GRAMOS DE CONTAMINANTE POR TONELADA Y MILLA NÁUTICA**

<b>EMISIONES MMPP y MMAA por TONELADA y DISTANCIA (SITUACIÓN DE BAJA CARGA TRANSPORTADA) [g/t·nm]</b>							
<b>FASES:</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>SO<sub>x</sub></b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>PM<sub>10</sub></b>	<b>PM<sub>2.5</sub></b>	<b>Totales</b>
DESATRAQUE	36,07	0,18	0,45	1,36	0,14	0,13	<b>38,33</b>
MANIOBRAS	437,70	0,82	5,98	10,67	0,83	0,81	<b>456,81</b>
SRZ	61,97	0,14	1,05	1,68	0,15	0,14	<b>65,14</b>
CRUCERO	1753,87	4,00	30,51	52,42	4,35	4,24	<b>1849,39</b>
ATRAQUE	34,11	0,15	0,41	1,20	0,12	0,11	<b>36,11</b>
CAR/DESC	9,11	0,01	0,16	0,19	0,02	0,02	<b>9,52</b>
<b>Totales:</b>	<b>2332,84</b>	<b>5,29</b>	<b>38,57</b>	<b>67,53</b>	<b>5,61</b>	<b>5,45</b>	<b>2455,29</b>

Para poder apreciar la influencia de la intensidad de carga transportada frente a la condición anterior en términos de cantidad de contaminantes producidos por tonelada y milla náutica, se ha representado en la tabla 42 las emisiones estimadas para las navegaciones con alta carga transportada en gramos de cada contaminante por cada tonelada y milla náutica navegada.

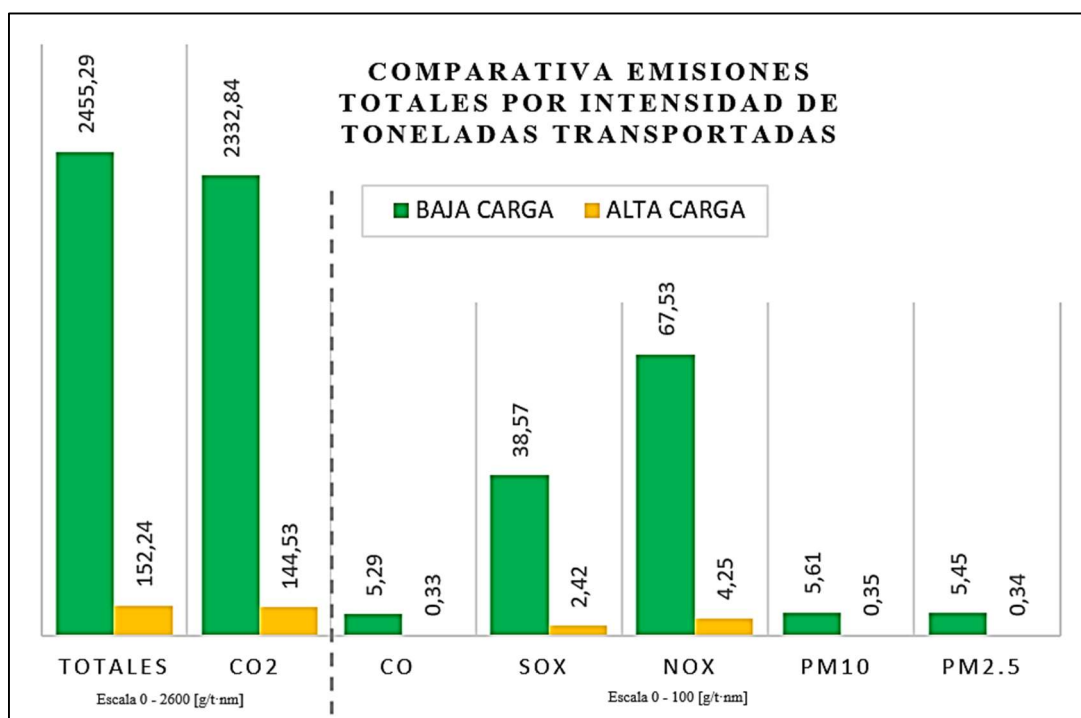
**TABLA 42. EMISIONES DE MMPP Y MMAA EN SITUACIÓN DE ALTA INTENSIDAD DE CARGA TRANSPORTADA EN GRAMOS DE CONTAMINANTE POR TONELADA Y MILLA NÁUTICA**

<b>EMISIONES MMPP y MMAA por TONELADA y DISTANCIA (SITUACIÓN DE ALTA CARGA TRANSPORTADA) [g/t·nm]</b>							
<b>FASES:</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>SO<sub>x</sub></b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>PM<sub>10</sub></b>	<b>PM<sub>2.5</sub></b>	<b>Totales</b>
DESATRAQUE	2,47	0,01	0,03	0,09	0,01	0,01	<b>2,62</b>
MANIOBRAS	27,23	0,06	0,41	0,73	0,06	0,06	<b>28,54</b>
SRZ	4,22	0,01	0,07	0,11	0,01	0,01	<b>4,44</b>
CRUCERO	107,65	0,25	1,87	3,22	0,27	0,26	<b>113,51</b>
ATRAQUE	2,33	0,01	0,03	0,08	0,01	0,01	<b>2,47</b>
CAR/DESC	0,62	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	<b>0,65</b>
<b>Totales:</b>	<b>144,53</b>	<b>0,33</b>	<b>2,42</b>	<b>4,25</b>	<b>0,35</b>	<b>0,34</b>	<b>152,24</b>

Cuando el buque de estudio navega en condición de alta carga transportada sus emisiones de contaminante por cada tonelada y milla náutica disminuyen sensiblemente

obteniéndose valores mucho más bajos que en la condición anterior. Analizando la diferencia entre los datos estimados de ambas situaciones se puede decir que en función de la intensidad de carga transportada nuestro barco de estudio podría disminuir sus emisiones contaminantes alrededor de 2.303 gramos por cada tonelada y milla náutica navegando en una condición de alta intensidad de carga transportada.

Al igual que en el supuesto anterior donde se estudiaron las emisiones en base a la intensidad de pasajeros transportados, en el estudio de la intensidad de carga transportada también podemos representar gráficamente los resultados para obtener una muestra más representativa de los datos obtenidos como se muestra en el siguiente gráfico 28.



**GRÁFICO 28. COMPARATIVA DE EMISIONES TOTALES EN SITUACIÓN DE ALTA Y BAJA INTENSIDAD DE CARGA TRANSPORTADA EN GRAMOS DE CONTAMINANTE POR PASAJERO Y MILLA NÁUTICA**

Los datos de emisiones generadas por cada navegación en estas condiciones son más bajas que las representadas en función de la carga de pasaje, mostrando valores más cercanos a la realidad del trabajo realizado por este buque al realizar un trayecto entre los puertos de la zona marítima de estudio ya que contempla la carga completa en toneladas transportadas por trayecto.

El dióxido de carbono sigue siendo el contaminante con mayor representación como es lógico, y se reduce más de 16 veces su valor cuando se realiza una navegación con alta intensidad de carga frente a una navegación con baja intensidad, pasando de emitirse 2.332,84 gramos por cada tonelada y milla náutica a 144,53 g/tnm.

Es también interesante valorar el margen de reducción con el que se puede llegar a operar respecto a las emisiones de NO<sub>x</sub> y de SO<sub>x</sub> debido a su gran influencia en la salud humana de los núcleos urbanos cercanos a la zona marítima donde transitan estos buques. Cuando se navega con alta intensidad de carga, este buque puede llegar a reducir las emisiones de estos contaminantes en más de un 93% pasando de 67,53 g/tnm a 4,25 g/tnm de NO<sub>x</sub> y de 38,57 g/tnm a 2,42 g/tnm de SO<sub>x</sub> respectivamente.





## **CAPÍTULO 7**

### CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo de tesis doctoral, y tras haber realizado su análisis y discusión, se puede observar que existen varias metodologías que permiten realizar estimaciones sobre los consumos energéticos y las emisiones contaminantes a partir de la información que se tiene a bordo de los propios buques. Estas metodologías permiten a las compañías navieras y al propio personal encargado de la planta energética de los barcos conocer la eficiencia con la que se está realizando el trabajo de transporte de la carga de un puerto a otro mediante la estimación de los consumos energéticos, así como el impacto medioambiental que se está produciendo derivado de su propia actividad.

Tras la realización de este trabajo de tesis doctoral se han obtenido las siguientes conclusiones:

- **Se reducen las incertidumbres existentes en las metodologías sometidas a estudio gracias al desarrollo de un modelo que combina las mejores aportaciones de cada una de ellas.** Tras analizar las metodologías de referencia, se ha elaborado un modelo que combina lo mejor de cada una de ellas, siendo calculadas las principales

variables (Potencia instantánea, factores de carga y consumos específicos entre otras), con el menor margen de incertidumbres. De esta forma se han eliminado los rangos de variación existentes entre los diferentes métodos que van de un 9% a un 10% en los resultados de consumos energéticos y emisiones contaminantes.

▪ **Se ha conseguido desarrollar una metodología que no depende de datos de Sistemas de Identificación Automática ni bases de datos similares.** Los sistemas automáticos actuales para registrar la posición, velocidad y rumbo de los barcos son susceptibles de tener problemas de registro de movimientos y tiempos, por lo que al prescindir de ellos se reducen las incertidumbres en los resultados. En este estudio la eliminación de datos obtenidos a partir de fuentes basadas en AIS consigue reducir las incertidumbres causadas por la cobertura de estos sistemas de identificación que en ocasiones puede no representar toda la actividad real que un buque está realizando. También existe discrepancias entre el número de barcos operativos en estos sistemas de control de la posición y los que aparecen registrados como en servicio en las bases de datos de IHSF. Este punto marca una notable diferencia entre la metodología aplicada en este trabajo de investigación y los estudios previos ya que dichas incertidumbres están prácticamente anuladas. Según el Tercer Estudio de Gases de Efecto Invernadero de la OMI de 2014, el uso de estos sistemas de información AIS son la principal fuente de incertidumbres de las estimaciones que se realizan para la obtención de consumos energéticos y emisiones contaminantes.

▪ **Se ha desarrollado un modelo que permite ser extrapolado a navegaciones de cualquier zona marítima ya sea entre puertos europeos o de Estados Unidos.** La metodología propuesta en esta tesis se fundamenta en los datos operacionales del buque y los parámetros propios de cada navegación, muchos de ellos recogidos en el SEEMP de cada buque, teniendo en consideración las principales variables que influyen en el cálculo del consumo y las emisiones para buques que navegan en la zona marítima de gran importancia medioambiental como es el Estrecho de Gibraltar.

▪ **El modelo propuesto permite realizar el cálculo de consumo energético y de emisiones contaminantes por cada pasajero y por cada tonelada que se transporta.** Para poder estimar datos que permitan realizar análisis comparativos entre distintos buques y frente a otras posibles alternativas de transporte, se ha demostrado, mediante los resultados de esta tesis doctoral, que es necesario obtener la información en función

de la intensidad de trabajo realizado tal y como se hace cuando se analizan otros medios de transporte tales como el terrestre o el aéreo, permitiendo además en el caso del transporte marítimo conseguir valores muy cercanos a la realidad del EEOI de los buques sometidos a estudio. Esta aportación es fundamental de cara a la optimización del transporte intermodal.

- **Se ha demostrado que es posible aplicar la metodología propuesta a cualquier tipo de buque independientemente de su actividad o carga transportada.** Los buques tipo Ro-Pax presentan una gran complejidad a la hora de realizar balances e inventarios de emisiones debido a la versatilidad de la carga transportada, siendo difícil medir la eficiencia con la que desarrollan su actividad. Prueba de ello son las dificultades encontradas por la propia OMI para desarrollar medidas tales como las líneas base del EEDI debido a la difícil clasificación de actividad de transporte.
- **Se ha aportado la posibilidad de tener un mayor control de la energía consumida y de optimizar el trabajo desarrollado por los buques sometidos a estudio.** La metodología bottom-up aplicada obtiene los valores de consumo energético y las emisiones de cada tipo de contaminantes por modo de navegación y en función del combustible utilizado en tiempo real, ofreciendo a los operadores de los buques un mayor control de la energía consumida a bordo y la posibilidad de optimizar el trabajo desarrollado de forma continua, avanzando hacia los nuevos conceptos de Monitoreo, Informe y Verificación (MRV) y Sistema de Recolección de Datos (DTS) propuesto por la Unión Europea y Organización Marítima Internacional para la optimización del Transporte Marítimo.

La metodología desarrollada en esta investigación no persigue reducir las emisiones contaminantes ni los consumos energéticos, lo que se pretende con este modelo propuesto es poder cuantificar el consumo de combustible y las emisiones tanto de los principales gases de efecto invernadero (GHG) como de aquellos altamente perjudiciales para la salud, por cada pasajero y tonelada que se transporta por unidad de distancia navegada. Esto son datos de vital importancia a la hora de realizar la optimización y el estudio del transporte intermodal y desarrollar un transporte de mercancías y pasajeros más eficiente tanto desde el punto de vista energético como desde el punto de vista medioambiental.

## **CAPÍTULO 8**

## CAPÍTULO 8

### PROPUESTAS DE FUTURO

El trabajo de esta tesis doctoral aporta una metodología que puede ser usada para contribuir a la realización de futuros inventarios de emisiones, el análisis de la eficiencia energética y ambiental del transporte marítimo o para la optimización del transporte intermodal, ofreciendo un menor margen de incertidumbres y en términos que permitan calcular la intensidad de trabajo realizado independientemente del tipo de buque o la ruta marítima estudiada.

A pesar de conseguir estimaciones más precisas que las metodologías que preceden a este estudio, siguen existiendo líneas de investigación que podrían ser desarrolladas para seguir avanzando en esta dirección.

Dentro de las emisiones contaminantes procedentes del transporte marítimo, podemos identificar, por un lado, aquellas que contribuyen al calentamiento global, donde el CO<sub>2</sub> lidera los gases de efecto invernadero (GHG). Por otra parte, también tendríamos aquellas que son perjudiciales para la salud, y que están relacionadas con enfermedades respiratorias y muertes prematuras. En la actualidad se está trabajando para poder identificar la repercusión de las emisiones provocadas por el transporte marítimo en la calidad del aire y en la salud humana, sobre todo en aquellas zonas donde existe una alta actividad marítima. Estas consecuencias negativas sobre la salud son conocidas, pero

todavía no existen evidencias directas ni datos concretos debido a la complejidad de la evolución de las emisiones desde la fuente hasta las personas afectadas. Analizar, por ejemplo, la repercusión en el personal del propio barco o aquellos cuyo trabajo está directamente relacionado con dicha actividad, podría ofrecer información importante a tener en cuenta, así como el estudio de los núcleos urbanos próximos a donde se realiza la operativa de los buques.

El desarrollo de esta tesis doctoral ha formado parte de los estudios que se están llevando a cabo en el proyecto que lleva por título *“La influencia del transporte marítimo sobre la salud humana. Propuesta de un modelo de cálculo de predicción de muertes y hospitalizaciones anuales en la provincia de Cádiz”* (2017 – 2020) financiado por la Consejería de Salud de la Junta de Andalucía y con fondos FEDER, donde se está desarrollando un modelo de cuantificación de muertes y hospitalizaciones producidas por las emisiones procedentes de los motores de los barcos, basado en las emisiones de contaminantes precursores medidos a bordo de cada fuente de emisión, barcos en este caso, que transitan por el Estrecho de Gibraltar así como los atracados en los puertos de Algeciras y Cádiz.

Para poder cuantificar todas estas emisiones se utilizan factores de emisión que relacionan los consumos energéticos con cada tipo de contaminante. Una posible disminución del margen de error en dicha cuantificación de emisiones sería la de poder cotejar estos factores de emisión con mediciones reales tomadas a bordo y de esa forma valorar la desviación existente, incluso pudiendo llegar a actualizar dichos factores. La información sobre este tipo de datos es muy importante para realizar estudios de impacto ambiental y de la calidad del aire, sobre todo en aquellas zonas costeras y portuarias donde el tránsito marítimo supone una actividad de peso.

El medio ambiente y la salud humana son los principales motivos que impulsan las medidas y estrategias marcadas para los próximos años desde la Organización Marítima Internacional (OMI) y otras instituciones competentes. Estas estrategias ya comentadas en esta tesis doctoral tienen como punto más ambicioso el objetivo de avanzar hacia un transporte marítimo con cero emisiones. Actualmente existe un importante problema económico entre el coste tecnológico actual y el de las energías limpias que podrían mejorar la eficiencia y conseguir el cambio necesario en los combustibles actuales.

El camino hacia la descarbonización propuesto por la OMI persigue alcanzar una reducción de al menos el 50% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) respecto a la línea base de 2008, según el acuerdo firmado en abril de 2018. Para avanzar en esta propuesta se ha planteado una estrategia que consta de medidas a corto, medio y largo plazo (2018-2023, 2023-2030 y 2030 en adelante respectivamente).

Las medidas a corto plazo implican la aplicación del Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI) para los futuros buques imponiendo cada vez requisitos más exigentes y abarcando a todos los buques posibles del sector del transporte marítimo. También se quiere incentivar técnicas que reduzcan los consumos, como la reducción de

la velocidad de navegación (Slow Steaming) o la optimización de las navegaciones de los buques. En general se quiere promover las tecnologías que ya tenemos a nuestro alcance, las cuales están relacionadas con un bajo consumo de carbono, así como estudiar pautas de intensidad de emisiones de carbono para los combustibles marinos desde su generación hasta su consumo en los barcos (Well-to-Wheel o Well-to-Tank y Tank-to-Propeller) y el desarrollo de alternativas que nos acerquen a las cero emisiones. Otro paso en esta línea es la implementación y consolidación de sistemas de recogida de información como el Sistema de Recopilación de Datos de la OMI (Data Collection System, DCS) o el planteado en el Reglamento de la Unión Europea 2015/757 de Seguimiento, Notificación y Verificación (Monitoring, Reporting and Verification, MRV) para la recogida de datos de consumos y emisiones de CO<sub>2</sub> de los buques.

En las etapas a medio y largo plazo se reforzarán las medidas adoptadas en la primera fase y se desarrollan otras que tienen previsto basarse en el propio mercado del sector del transporte marítimo y su evolución para conseguir reducir las emisiones. Herramientas para el control y la optimización del trabajo desarrollado por los buques serán cada vez más importantes, por lo que la realización de un Plan de Gestión de Eficiencia Energética (SEEMP) cada vez más específico, así como un Índice de Eficiencia Energética Operacional (EEOI) lo más preciso posible, contribuirán de forma notable a conseguir mejores resultados.

Las medidas implementadas hasta la fecha prevén que conseguirán una reducción de las emisiones apreciable, sobre todo las asociadas a las SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y el material particulado, impulsado claramente por las actuales limitaciones de contenido en azufre de las Zonas de Emisiones Controladas (ECA) y las posibles zonas ECA futuras. Pero a pesar de esto, para lograr avanzar hacia el objetivo de cero emisiones en el transporte marítimo dentro de los plazos marcados, es necesario tomar otras medidas y alternativas con carácter urgente. Desde los gobiernos se tomarán acciones para acelerar el proceso hacia la descarbonización mediante el pago de impuestos y tasas medioambientales, la imposición de cargos económicos si se superan los límites de emisiones, así como la generación del concepto de créditos de emisiones y financiación económica para impulsar aquellas medidas enfocadas a la reducción de las emisiones.

Teniendo en cuenta las actuales y futuras limitaciones de emisiones, junto con los objetivos previstos por las estrategias marcadas, el camino hacia la reducción de contaminantes procedentes del sector y la eliminación del carbono en los combustibles, presenta el mayor reto para el transporte marítimo. El corto plazo para alcanzar estas metas implica que se tomen acciones a la mayor brevedad mediante las opciones y medios disponibles a nuestro alcance a día de hoy. En la fase actual se barajan las posibilidades de utilizar combustibles tradicionales en simultaneo con métodos de tratamientos y tecnologías para la reducción de emisiones que les permita cumplir con los límites establecidos. Otra alternativa es utilizar combustibles sin azufre, o con muy bajo contenido en su composición, que permitan reducir sensiblemente las emisiones contaminantes y cumplir con la normativa prevista a corto plazo. Con una visión más



amplia, la desvinculación del carbono pasaría por la utilización de combustibles alternativos y el desarrollo de tecnologías que mejoren la eficiencia energética, reduciendo los consumos, y consecuentemente las emisiones.

## **COMBUSTIBLES BASADOS EN EL CARBONO Y REDUCCIÓN DE EMISIONES**

Ante las actuales y futuras restricciones de emisiones contaminantes, la de mayor impacto es la del contenido en azufre en los combustibles a nivel mundial a partir de 2020 y la de las Zonas de Emisiones Controladas. Estas medidas provocarán que el mercado del combustible se tenga que adaptar lo antes posible.

El combustible utilizado actualmente en el transporte marítimo internacional es el Combustible Residual (Residual Oil, RO) o Fuel Oil Pesado (Heavy Fuel-Oil, HFO) con más de un 3,5% de contenido en azufre. Este combustible se podría definir como fuel de alto azufre el cual se podría seguir utilizando si se cuenta a bordo de los buques de un sistema de tratamiento de lavado de los gases de escape (Scrubber). Esta tecnología es una de las opciones que se está implementando para acondicionar la flota actual y los buques construidos en los últimos años. Presenta la ventaja de poder seguir utilizando combustibles de alto contenido en azufre que tras el tratamiento de los gases de escape reducen casi en su totalidad las emisiones de SO<sub>x</sub>.

Una de las problemáticas que se está dando es que algunos países no reconocen que tener instalados estos sistemas de filtrado de gases a bordo sea garantía de que no se emiten emisiones en sus puertos y exigen además que se utilice un combustible con bajo contenido en azufre. Este tipo de consideraciones conlleva a que los armadores vean con desconfianza la inversión en este tipo de sistemas.

Dentro de los Scrubbers, se pueden clasificar en función de su ciclo de trabajo como sistemas de ciclo abierto, sistemas de ciclo cerrado o sistemas de ciclo híbrido. La primera opción utiliza el agua salada del mar para el tratamiento de los gases de los motores que resulta lo más cómodo, pero que es altamente sensible a la temperatura, la alcalinidad y la salinidad del agua, que podría afectar a su funcionalidad. Los de ciclo cerrado ofrecen la desvinculación de las condiciones del agua en el que se esté navegando y no se realiza ningún vertido como consecuencia de su uso. Este sistema implica una gestión de aguas residuales mayor y un consumo de agua dulce extra. El sistema híbrido de Scrubber combina lo mejor de cada uno de los procesos de lavado de gases de escape descritos anteriormente, pero incrementa notablemente la inversión inicial. Actualmente se está valorando los costes de estos equipos frente al uso de combustibles residuales con precios más bajos que otros menos contaminantes, con la incertidumbre de si tener instalado estos sistemas de filtrado sería suficiente para poder cumplir con las normativas, o se tendría que tomar otras medidas complementarias con los consiguientes gastos económicos.

Los combustibles residuales con bajo azufre que pueden cumplir con la normativa de del 0,5% y 0,1% en contenido, abarcan el grupo de los Marine Gas-Oil o Marine Distilled-Oil y los combustibles residuales pesados denominados como Ultra-Low Sulphur Fuel Oil (ULSFO). Estos combustibles se podrían utilizar en los buques actuales sin necesidad de remotorizar ni instalar sistemas de filtrado de gases de escape Scrubber, pero su precio es bastante más elevado, y esto acarrea consecuencias muy negativas para el sector. Los ULSFO son más atractivos económicamente que el conjunto de los MGO/MDO, aunque presentan el inconveniente de la logística y disponibilidad a nivel internacional junto con la posible aparición de problemas derivados de una difícil estandarización que puede provocar problemas de incompatibilidades entre combustibles de diferentes suministros y con los propios aceites lubricantes de los motores.

El uso de combustibles sin azufre en su origen es una de las medidas con mayor peso para cumplir con los límites establecidos a partir de 2020. Esto implica actualizar los motores de los buques existentes e instalar motores preparados para consumir estos combustibles en los barcos de nueva construcción. Esta apuesta es una de las más populares entre los diferentes armadores y el Gas Natural Licuado (LNG) es el combustible que parece ofrecer los mayores beneficios medioambientales al tener un precio competitivo y ser el combustible fósil con menor relación de carbono-hidrógeno. Estos beneficios implican cero emisiones de azufre y una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a otros combustibles fósiles. El uso del LNG como sustituto de los combustibles de alto azufre reduciría por completo las emisiones de SO<sub>x</sub> y de partículas al no contener azufre en su origen. Incluso cuando es utilizado en motores duales donde se necesita una pequeña inyección de combustible diésel, sus emisiones de SO<sub>x</sub> son reducidas en más de un 90% en comparación con los combustibles pesados.

Si se centra la atención en las emisiones de NO<sub>x</sub>, es necesario optimizar las tecnologías de los motores para disminuir su generación durante la combustión, y el tratamiento de los gases de escape para poder cumplir con los niveles de Tier II y III si se utiliza un combustible de residual de bajo azufre. Dentro de varias opciones disponibles tecnológicamente, los motores marinos convencionales alcanzan los niveles deseados combinando diseños con tecnologías de última generación con sistemas de Recirculación de los Gases de Escape (EGR) y filtros de Reducción Catalítica Selectiva (SCR).

Si se desea cumplir con todas las emisiones utilizando combustible fósil, el LNG es la opción que ofrece mejores prestaciones, aunque es necesario valorar el ciclo de funcionamiento que se utilice. Este combustible no contiene azufre y sus emisiones de CO<sub>2</sub> son inferiores respecto a los combustibles marinos de bajo azufre, pero la posibilidad de emitir metano sin quemar (Methane Slip) es un punto muy importante a tener en cuenta, ya que su repercusión en el efecto invernadero es de 25 a 30 veces superior comparado al del CO<sub>2</sub>. Si el LNG es quemado en un motor que trabaje mediante ciclo Diésel las fugas de metano sin quemar prácticamente son inexistentes al trabajar con presiones más elevadas, pero se necesitarían tecnologías EGR y SCR para cumplir con los niveles Tier III de NO<sub>x</sub>. Por el contrario, si el LNG es quemado en ciclo Otto mediante

motores de media y baja velocidad, estos equipos no serían necesarios para cumplir con dicha normativa, pero se debe controlar la posibilidad de emitir fugas de metano, aunque los fabricantes indican que la reducción de CO<sub>2</sub> es de un 10 a un 20 por ciento frente a los motores que consumen HFO y MDO. El Gas Licuado del Petróleo (LPG) es una alternativa al LNG que se está utilizando en algunos buques, que debido a la carga que transportan o a la ruta que realizan, tienen condiciones favorables para su logística y uso. Este gas ofrece resultados muy parecidos a los del LNG, aunque su almacenaje debe hacerse en tanques presurizados o con refrigeración a bajas temperaturas. La opción de usar tanques presurizados es la que menos modificaciones implica y la que aporta mayor facilidad de operación en el buque, pudiendo llegar a ser más económica esta instalación en el caso del LPG que una instalación de características similares de LNG, aunque actualmente no se ha apostado lo suficiente por este combustible como para competir con el gas natural licuado.

El gas natural licuado como alternativa a los combustibles marinos de bajo contenido en azufre es una de las alternativas con mayores posibilidades por los beneficios respecto a emisiones y por tener unos precios medios actualmente más bajo que el fuel-oil marino. Con perspectivas de futuro, hay mucha incertidumbre sobre cómo va a evolucionar estos precios y si se va a conseguir adaptar los medios de distribución, almacenaje y suministros para abastecer un consumo a gran escala en todos los puertos y principales rutas marítimas comerciales.

El Metanol (CH<sub>3</sub>OH) es otro combustible líquido que permite ser utilizado frente a los combustibles convencionales para cumplir con los niveles de emisiones. Dependiendo de su método de producción puede ofrecer unas emisiones de CO<sub>2</sub> finales que sean menos contaminantes que otros combustibles de bajo azufre, pero la mayor producción de metano actual es basada en el uso de gas natural o carbón. Con su consumo se eliminan casi totalmente las emisiones de azufre, aunque se comparta de forma similar que el LPG con respecto a las emisiones de NO<sub>x</sub>, dependiendo del ciclo operativo en el que se utilice para cumplir con las normativas o tener que usar equipos de reducción de emisiones forzosamente. Una cualidad que tiene es que se puede convertir en dimetil éter y utilizarse en motores diésel marinos. Tiene la contra de que su punto de inflamación es bajo (11°C – 12°C) y su densidad junto con un poder calorífico más bajo que otros combustibles (19,5 MJ/kg) hace que necesite tanques mucho más grandes de almacenaje privando de espacio para carga los buques, aunque su almacenaje no requiere de tanques específicos ni grandes modificaciones frente a tanques de almacenaje de combustibles marinos.

## **COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS**

Para conseguir acercar el sector del transporte marítimo hacia la descarbonización y las cero emisiones, el uso del LNG o los combustibles marinos de bajo contenido en

azufre junto a los sistemas de reducción de gases contaminantes, no conseguirían alcanzar los objetivos marcados con los medios actuales. Los combustibles alternativos ofrecen la posibilidad de desvincular el consumo energético del carbono, y por lo tanto reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a los niveles deseados para frenar el calentamiento global a la vez que se eliminan las emisiones perjudiciales para la salud y que dañan la calidad del aire. A continuación, se expone un resumen los combustibles considerados como alternativas de mayor relevancia y que podrían contribuir a frenar las emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte marítimo dentro de los plazos marcados en las estrategias internacionales.

#### *BIOFUEL*

Este grupo de combustibles alternativos está compuesto por una gran variedad de productos obtenidos a partir de biomasa o de los residuos de la misma. Mediante diferentes procesos se pueden obtener tanto combustibles líquidos como gaseosos que pueden utilizarse en motores diésel marinos sin apenas tener que realizar modificaciones excesivamente importantes. En función de las materias primas a partir de las que se obtienen, así como de los procesos y tratamientos utilizados, podemos encontrar biocombustibles de primera generación, con mayor coste para su elaboración y resultados menos atractivos para los fines que se pretenden, y biocombustibles de segunda y tercera generación que poseen mejores expectativas como posibles sustitutos frente a los combustibles fósiles.

El biofuel de aceite vegetal o Straight Vegetable Oil (SVO) es un posible sustituto del HFO, el aceite vegetal tratado con hidrogeno o Hydrotrated Vegetable Oil (HVO) también es compatible con las instalaciones y sistemas de este tipo de motores, a pesar de poder necesitar pequeñas adaptaciones a realizar por los fabricantes de motores y ofreciendo buenos resultados en su uso. El éster metílico de ácidos grasos o Fatty Acid Methyl Ester (FAME) y el biogás licuado (LBG) son dos opciones que se asemejan al MGO y LNG.

Estos biocombustibles pueden hacer uso de las instalaciones y sistemas de distribución actuales de los combustibles marinos convencionales con algunas adaptaciones menores y eso hace que se baraje su posible viabilidad, aunque todavía su coste de elaboración es muy elevado y conlleva impactos negativos en el sector agrícola

debido a la explotación de las materias primas para la biomasa y la repercusión de contaminación en los procesos de cultivos vegetales a causa del uso de fertilizantes y grandes consumos de agua.

La gran ventaja que ofrecen estos combustibles alternativos, además de poder prácticamente sustituir los combustibles marinos actuales sin grandes costes de modificaciones y distribución, es que tienen muy bajo nivel de emisiones de SO<sub>x</sub> y material particulado. Respecto a las emisiones de NO<sub>x</sub> el aceite vegetal tratado con hidrógeno alcanza niveles más bajos que combustibles similares tradicionales, aunque el FAME emite valores un poco más elevados que los combustibles marinos convencionales. Por otra parte, el biogás licuado se comporta de manera muy similar al LNG permitiendo cumplir con las normativas actuales sin necesidad de dispositivos de tratamiento de emisiones adicionales.

En términos de emisiones de GHG, estos biocombustibles adquieren la categoría de combustibles neutro en CO<sub>2</sub> por entenderse que las emisiones de este contaminante al utilizar el combustible son equivalentes al dióxido de carbono capturado de la atmosfera durante el ciclo de vida de las plantas utilizadas para la biomasa de la que se elaboró el combustible.

#### *HIDRÓGENO*

Como alternativa a los combustibles actuales presenta muchos desafíos todavía por superar, pero es potencialmente uno de los combustibles que podría llegar a conseguir un transporte marítimo con cero emisiones.

Actualmente la producción de H<sub>2</sub> se realiza principalmente mediante el reformado con vapor a partir de combustibles fósiles, el más frecuente para este fin es el LNG. Esta forma de obtener el hidrógeno podría llegar a ser viable medioambientalmente si se utilizaran tecnologías de captación de CO<sub>2</sub> en el proceso de reformado.

El otro camino para obtener este combustible es mediante electrólisis, pero requiere un alto coste energético y que eleva su precio de generación notablemente en función del mercado eléctrico. Esta producción de H<sub>2</sub> es más atractiva si se asocia a una forma de almacenar excedentes y picos de energías renovables como la eólica o solar,

pudiendo utilizar después dicha energía en pilas de combustible (Fuel Cells) o motores de combustión.

El hidrógeno se suele almacenar comprimido por encima de 700 bar o en estado líquido criogenizado, pero ambos caminos implican un alto coste energético indirecto y ofrecen una densidad energética muy elevada del orden de ocho veces más volumen de almacenamiento del H<sub>2</sub> líquido frente al HFO y treinta veces mayor el comprimido frente al LNG. También existe la posibilidad de transportarlo como amoníaco líquido y posteriormente usarlo directamente para la propulsión tanto en motores como en pilas de combustible.

El uso de hidrógeno en motores de combustión elimina por completo las emisiones de CO<sub>2</sub>, azufre y partículas, aunque su rendimiento es más bajo que utilizando combustibles convencionales y además se seguirían generando NO<sub>x</sub>. Estos motores están todavía en desarrollo y alcanzar las potencias necesarias para el transporte marítimo dificulta su evolución. El uso de pilas de combustible es la tendencia con mejores perspectivas para producir cero emisiones, aunque necesita que todavía se siga trabajando para satisfacer las necesidades de operatividad y potencia. La combinación de estas pilas de hidrógeno junto con baterías podría llegar a ser una alternativa aplicable a los futuros barcos del transporte marítimo.

#### *FUEL SINTÉTICO (E-FUEL)*

Es el resultado de aplicar el concepto denominado como power-to-fuel que se fundamenta en la generación de combustibles sintéticos a partir de obtenido por electrólisis, y se sintetiza posteriormente con carbono presente en el CO<sub>2</sub> de la atmósfera o con nitrógeno para conseguir combustible sintético líquido o gas sintético.

Estos combustibles sintéticos ofrecen una potencial alternativa para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al considerarse con emisiones de CO<sub>2</sub>-neto si se obtiene la electricidad para la generación del hidrógeno a partir de energías renovables como la solar o la eólica. El dióxido de carbono generado en la combustión de este fuel sintético equivaldría al utilizado para sintetizar el carbono del propio combustible con el hidrógeno.

Otras emisiones como los NO<sub>x</sub> no se reducirían por el uso de estos combustibles alternativos ya que dependen de la tecnología usada en los motores donde se queme y de la forma en la que se produzcan los procesos de combustión. Por este motivo podrían llegar a ser una solución para combinar con combustibles convencionales consiguiendo mezclas de combustibles de bajas emisiones de carbono que puedan cumplir con las futuras normativas de CO<sub>2</sub> reduciendo notablemente su huella de carbono frente a combustibles fósiles sin mezclar.

El coste para la generación de este tipo de combustibles sintéticos es elevado y no es competitivo a día de hoy, pero los futuros escenarios pueden cambiar la percepción de las inversiones y dar un giro a los procesos de generación de estos combustibles alternativos. Hay que tener en cuenta que podrían distribuirse y almacenarse utilizando las infraestructuras actuales para los HFO y el LNG además de poder utilizarse directamente en los motores de los barcos actuales incluso permitiendo realizar mezclas que reduzcan su coste además de las ventajas medioambientales.

#### *NUCLEAR*

Los combustibles nucleares son comúnmente utilizados por la marina de guerra de varios países mediante pequeñas plantas energéticas instaladas a bordo de barcos y submarinos donde se genera vapor para turbinas de propulsión y turbogeneradores eléctricos. Estos reactores reducen drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero y no perjudican la calidad del aire además de ofrecer una gran densidad de potencia sin costes elevados.

El uso de esta tecnología en el transporte marítimo cumpliría con la problemática actual y futura de emisiones contaminantes a la atmósfera, pero existen fuertes barreras sociales y políticas que hacen prácticamente imposible el desarrollo de energías nucleares para los buques mercantes.

La posibilidad de accidentes y otras situaciones no controlables que implican contaminación por radiación y catástrofes medioambientales, dificultan claramente el avance tecnológico que contribuya a solventar problemas como el transporte y distribución del uranio, las técnicas de desmantelamiento o el desarrollo de los reactores y sus componentes.

## **MEDIDAS TECNOLÓGICAS PARA LA REDUCCIÓN DE CARBONO**

El desarrollo tecnológico en el sector marítimo debe avanzar a gran velocidad para intentar superar las barreras técnicas que actualmente existen para desvincular el carbono de los sistemas de propulsión y generación eléctrica en los buques.

Impulsar un cambio en los combustibles hacia la descarbonización es uno de los caminos principales por recorrer, pero es posible acelerar el proceso si se desarrollan tecnologías que permitan propulsar los buques y obtener la energía necesaria para su actividad reduciendo significativamente las emisiones tanto de CO<sub>2</sub> como de gases nocivos para la salud.

La utilización de algunas medidas tecnológicas podría ayudar a conseguir cumplir con los objetivos fijados si se utilizan en combinación de combustibles, y si evolucionaran lo suficiente, incluso podrían cambiar los sistemas energéticos actuales llegando a sustituirlos por otros más eficientes y con cero emisiones. Entre las diferentes opciones sobre las que se está investigando, a continuación se comentan aquellas cuyo avance tecnológico y mejora podría marcar una diferencia significativa en los escenarios futuros.

### *BATERÍAS*

Son una solución muy versátil para la reducción de emisiones y cumplir con las normativas ya que su impacto medioambiental depende del combustible primario utilizado para la producción de energía eléctrica que luego se almacena a bordo. Estas baterías serían las encargadas de alimentar propulsores eléctricos de la misma forma que se utilizarían con las pilas de combustible y ofrecen una gran variedad de oportunidades para optimizar los sistemas energéticos.

A medida que se abaraten los costes de las baterías y se avance en el desarrollo tecnologías que permitan prolongar su vida útil y mejorar las prestaciones (capacidad, peso, durabilidad, etc.), los buques con propulsión eléctrica podrán tener mayor representación en el transporte marítimo. Actualmente existen navieras y proyectos que apuestan por propulsiones híbridas con prometedores resultados que ayudan a avanzar hacia un transporte más limpio y reduciendo el uso del carbono.



La distribución y generación de electricidad de fuentes no contaminantes es fundamental para abastecer la posible demanda de electricidad a bordo de los barcos, aunque el mayor problema seguirá siendo la evolución de las tecnologías para su almacenaje a bordo. El transporte marítimo de corta distancia obtiene más facilidades para abastecer las baterías de los barcos mediante el uso de energías limpias. Para líneas de transporte de larga distancia marítima se encuentran mayores inconvenientes vinculados con las limitaciones actuales de almacenamiento, potencia y duración de su ciclo de vida útil.

Los últimos avances han conseguido mejorar las baterías mediante nuevos materiales para los ánodos, como el silicio o el titanio, y la posibilidad de emplear tecnologías de electrolitos sólidos que dan como resultados beneficios en los costes con altos rendimientos y alcanzando ventajas significativas desde el punto de vista de la seguridad.

#### *PILAS DE COMBUSTIBLE O FUEL CELLS*

Estos equipos son capaces de transformar la energía química almacenada en el combustible directamente en electricidad y calor mediante procesos de oxidación electroquímica. En función del tipo de combustible usado y la tecnología del equipo pueden alcanzar altos rendimientos que superan a los motores convencionales eliminando además el ruido y las vibraciones. Para su utilización en buques de propulsión eléctrica ofrecen una alternativa realmente prometedora, aunque su futuro está ligado a las mejoras tecnológicas en los medios para el almacenaje de la energía a bordo de los buques.

Las pilas de combustible utilizan normalmente hidrógeno como fuente de su energía química, aunque también pueden modificarse otros combustibles para enriquecerlos con hidrógeno y usarlos en estos equipos. Cuando se utiliza gas natural o metanol en las pilas de combustible se consigue reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta en un 30% gracias a su alto rendimiento frente a motores convencionales, además de eliminar casi por completo las emisiones de azufre, NO<sub>x</sub> y partículas.

En la actualidad se estudia el uso de las pilas de combustible en diferentes barcos para mejorar sus prestaciones y comprobar su posible incorporación como alternativa realista en el transporte marítimo. Para ello se trabaja en nuevas tecnologías que mejoren

su vida útil y ofrezcan inversiones económicas más bajas. Las pilas de membrana de protones de baja y alta temperatura podrían llegar a cumplir con las necesidades del sector al prolongar su durabilidad reducir los costes. Las pilas de combustible con tecnología de óxido sólido se encuentran dentro de las opciones más prometedoras sobre todo si se combinan con baterías alimentadas con energías renovables.

#### *ENERGÍA EÓLICA (WIND ASSISTANCE)*

Utilizar el viento como energía propulsiva para los barcos es una de las fuentes de energía más antiguas e inagotable y libre de emisiones. En la actualidad se ha retomado esta tecnología para intentar disminuir el consumo de los combustibles fósiles en los buques mercantes, pero teniendo en cuenta algunos avances tecnológicos de alto rendimiento que consiguen aprovechar la energía eólica mediante medios de vanguardia.

Los rotores Flettner son una alternativa a las velas tradicionales que ofrecen mayor rendimiento de empuje por metro cuadrado de superficie, fueron inventadas a principios del siglo XX y transforma el movimiento giratorio provocado por el viento de grandes cilindros verticales en una fuerza de empuje perpendicular a la dirección del viento. Las cometas de tracción son otra posibilidad para aprovechar la fuerza del viento, estas cometas ofrecen las posibles ventajas de aprovechar vientos más potentes al poder situarse a mayores altitudes y pudiendo aumentar su tamaño todo lo deseado sin ocupar espacio en las cubiertas del buque. Las velas convencionales mejoradas son también otras variables que se podrían utilizar mediante nuevos diseños, materiales y automatismos. En este grupo podemos encontrar las velas automatizadas libres de manipulación, las DynaRig con estructuras optimizadas para grandes buques y las velas rígidas desarrolladas para embarcaciones ligeras en la alta competición.

Estos conceptos no están destinados a sustituir completamente los propulsores mecánicos actuales, pero pueden contribuir bastante a reducir los consumos de combustibles. Las velas y sus variantes tienen mejores rendimientos en barcos poco tamaño y a bajas velocidades de navegación. En buques de mayor tamaño pueden llegar ahorrarse importantes cantidades de energía cuando se alcancen velocidades máximas durante periodos estables y se utilicen rotores Flettner o cometas de tracción como ayudas a la propulsión. Estos sistemas se observan con positividad principalmente para su

aplicación en aquellas rutas marítimas donde se pueden obtener condiciones relativamente favorables gracias a los vientos de navegación.

Esta tecnología se encuentra todavía en una fase inicial que impide predecir si tendrá un papel importante en los próximos años, pero dependerá en gran medida de la inversión tecnológica que se haga para solventar los problemas de aplicación en las distintas condiciones de operatividad y teniendo en cuenta los diferentes tipos de buques que componen el sector del transporte marítimo de mercancías.

#### *ENERGÍA SOLAR (SOLAR ASSISTANCE)*

El uso de paneles solares para captar la energía del sol aprovechando las superficies de las cubiertas superiores de los buques es otra de las tecnologías que se han llegado a plantear para incrementar la reducción del consumo de combustibles marinos en algunas embarcaciones muy específicas.

El ambiente marino y la tecnología actual no han conseguido frenar el deterioro prematuro de los paneles que incrementa los problemas de inversión económica. El porcentaje de energía que se estima poder ahorrar no llega a valores superiores a un 12%, se ha estudiado la utilización de esta tecnología junto con el uso de asistencia eólica aprovechando la superficie de las velas como paneles solares llegando a conseguir reducir consumos en valores cercanos a un 40% en condiciones de navegación favorables. El desarrollo de los sistemas de reducción de energía mediante la energía solar para el transporte marítimo se encuentra en una fase embrionaria de la que no se pueden obtener datos sobre su posible rentabilidad económica ni funcionalidad a largo plazo.

#### *REDUCCIÓN DE VELOCIDAD (SLOW STEAMING)*

Esta medida está enfocada a una reducción los consumos y emisiones para algunos buques concretos que debido al tipo de navegación que realizan, pueden llegar a alcanzar reducciones de hasta un 30% según la IMO. Los buques portacontenedores, los cargueros y los petroleros son los principales objetivos de estas medidas que se fundamentan en reducir sus velocidades de servicios entre 3 y 10 nudos dependiendo del grado de reducción de velocidad que se esté aplicando.

Esta medida de reducción de consumo cuenta con la ventaja de que se puede aplicar sin realizar modificaciones en los buques actuales, pero cuenta con la desventaja de que reducir la velocidad implica aumentar la carga o el número de buques en actividad para abastecer las demandas de mercancías en las líneas afectadas. Para su posible implantación en rutas y servicios muy concretos se baraja la posibilidad de incentivos económicos o regulaciones que impulsen a los armadores a adoptar estas medidas con objetivos medioambientales no vinculados a los mercados de combustible.

#### *PINTURAS Y TRATAMIENTOS ANTI-FOULING*

Es una práctica que ya se está implementando en un alto porcentaje de los barcos del sector marítimo debido a que supone una inversión que se recupera a lo largo de la vida útil de barco gracias a una mejora en el desplazamiento del buque sobre el agua que reduce el consumo de combustible para la propulsión.

Durante muchos años se han utilizado tratamientos y pinturas para el casco de los barcos que evitan la corrosión y la adherencia de organismos que aumentan la resistencia al avance del barco en el agua e incrementan los consumos de combustible. Los nuevos tratamientos desarrollados en la actualidad obtienen óptimos resultados y cumplen con las legislaciones de preservación del medio marino al prescindir de sustancias nocivas como el tributilo de estaño u otros biocidas.

La aplicación de estos tratamientos evita el ensuciamiento del casco de los barcos mejorando su eficiencia de navegación y ahorrando costes de mantenimientos para la limpieza de los mismos. Sus precios resultan elevados frente a tratamientos más convencionales pero cada vez son más los armadores que deciden asumir la inversión motivados por las mejoras comentadas y los consecuentes beneficios medioambientales al no contener sustancias nocivas para el entorno marino.

#### *RECUPERACIÓN DE ENERGÍA RESIDUAL (WASTE HEAT RECOVERY)*

Los Sistemas de Recuperación de Energía Residual (WHRS) se encargan de obtener energía útil a partir de las pérdidas de calor que se tienen a través de los gases de

escape y la refrigeración de los motores. Estas pérdidas alcanzan valores cercanos al 50% de la energía consumida, por lo que, si se pueda transformar parte de ellas en energía eléctrica o mecánica, se mejora el rendimiento del conjunto.

Estos sistemas incorporan ciclos de generación de vapor de alto rendimiento térmico que permiten reducir los costes de inversión y los consumos de combustibles favoreciendo la posibilidad de rentabilizar la inversión en plazos de tiempo aceptables. Pueden llegar a conseguir reducciones de consumo cercanas al 15% y la posibilidad de utilizarse de forma combinada con otras medidas actuales para reducir el consumo del carbono en el transporte marítimo.

Inicialmente estas tecnologías fueron desarrolladas por los fabricantes de motores, pero no encontraron un mercado que estuviera interesado en realizar dichas inversiones. En la actualidad, con los nuevos escenarios cada vez más cercanos, se le ha dado una segunda oportunidad volviendo a verse como mejoras atractivas desde un nuevo punto de vista económico y ambiental, aunque alcanzando una recuperación de energía moderada que podría llegar a optimizarse en el futuro.



## REFERENCIAS

Anon., 2015. *Methodologies for estimating shipping emissions and energy*, s.l.: ELSEVIER.

Arof, A. M., 2015. Determinants for a Feasible Short Sea Shipping: Lesson from Euorpe for ASEAN. *Asian Social Sicence*, 1(15), pp. 229-238.

Baird, A. J. & Pedersen, R. N., 2013. Policy implicatons fo CO2 emission for island ferry services. *Scottish Transport Applications Reserch*.

Bännstrand, Jönsson, Johnson & Karlsson, 2016. *Study on the optimization of energy consumption as part of implementation of a SEEMP*, London: International Maritime Organization.

Bazari & Longva, 2011. *ESTIMATED CO2 EMISSIONS REDUCTION FROM INTRODUCTION OF MANDATORY TECHNICAL AND OPERATIONAL ENERGY EFFICIENCY MEASURES FOR SHIPS*, s.l.: MEPC 63/INF.2 IMO.

Bazari, Z., 2016. *Ship Energy Efficiency Regulations and Relatd Guidelines*, London: International Maritime Organisation.

Calderay, F., 2015. *Consumo energético y cuantificación de emisiones contaminantes en el transporte marítimo. Propuesta de un modelo de cálculo óptimo basado en el análisis de los métodos publicados*, Cádiz: Universidad de Cádiz.

Christodoulou, A., Raza, Z. & Woxenius, J., 2019. The Integration of RoRo Shipping in Sustainable Intermodal Transport Chains: The Case of a North European RoRo Service. *Sustainability*, 11(2422), pp. 1-17.

Cofala, J. et al., 2007. *Analysis of Policy Measures to Reduce Ship Emissions in the Context of the Revision of the National Emissions Ceilings Directive*, Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis.

Cohen, A. J. et al., 2005. *The global burden of disease due to outdoor air pollution. J. Toxicol. Environ. Health, Part A*, s.l.: s.n.

Corbett, J. J., Wang, C., Winebrake, J. J. & Green, E., 2007a. *Allocation and Forecasting of Global Ship Emissions*, Boston: Clean Air Task Force and Friends of the Earth International.

Corbett, J. et al., 2007b. *Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment*, s.l.: American Chemical Society.

Crespo, L., 2018. Herramienta multimodal de estimación de GEI's en la planificación del transporte (I). *Ingeniería Civil*, Issue 191, pp. 93-104.

DELAMARIN, 2011. *Applicability and Refinement of the EEDI for RoRo, RoPax Vessels and Specialized Ships*, s.l.: EMSA.

DNV GL, 2017. *EU MRV Regulation*, Hamburg: DNV GL.

Durán-Grados, Mejías, Musina & Moreno-Gutiérrez, 2018. The influence of the waterjet propulsion system on the ships' energy consumption and emissions inventories. *Science of the Total Environment*, pp. 496-509.

Duran, V., Uriondo, Z. & Moreno-Gutiérrez, J., 2012. The impact of marine engine operation and maintenance on emissions. *Transportation Research Part D*, Issue 17, pp. 54-60.

Finnsgård, Raza, Holm & Woxenius, 2017. Costs, not SECAs make RoRo steam slow. HANSA International Maritime. *HANSA*, Issue 154, pp. 42-43.

Goldsworthy, L. & Galbally, I., 2011. Ship engine exhaust emissions in waters around Australia - an overview. *Air Qual. Clim. Chang.* , 4(45), pp. 24-32.

Hjelle, H., 2010. The double load factor problem of Ro-Ro shipping. *Maritime Policy & Management*, Issue 38, pp. 235-249.

Hunsecker, J. T., Przelomski, D., Bashkoff, A. & Dixon, J., 2018. *Uncertainty Analysis of Methods Used to Measure Ship Fuel Oil Consumption*, London: Shipwright (IMO).

IEA, 2009a. *Transport, Energy and CO2*, France: OECD/IEA.

IEA, 2009b. *World Energy Outlook*, France: International Energy Agency.



IEA, 2016. *International Energy Outlook 2016* , s.l.: U.S. Energy Information Administration.

IMO DCS, 2018. *USER GUIDANCE ON THE SHIP FUEL OIL CONSUMPTION GISIS MODULE (IMO SHIP FUEL OIL CONSUMPTION DATABASE)*, London: International Maritime Organization.

IMO, 2009. *International Shipping and Market Based Instruments*, s.l.: MEPC 60/INF 21.

IMO, 2009. *GUIDELINES FOR PORT STATE CONTROL UNDER THE REVISED MARPOL ANNEX VI*, s.l.: s.n.

IMO, 2015. *Study of Emission Control and Energy Efficiency Measures for Ships in the Port Area*, London: International Maritime Organization.

IMO, 2016. *Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines*, London: International Maritime Organisation.

Jalkanen, J. et al., 2012. Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Issue 12, pp. 2641-2659.

Jalkanen, J. P. et al., 2009. A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Issue 9, pp. 9209-9223.

Kristensen & Hagemeister, 2012. *Environmental Performance Evaluation of Ro-Ro Passenger Ferry Transportation*, London: MEPC committee under The International Maritime Organisation.

López-Navarro, M. A., 2014. Environmental Factors and Intermodal Freight Transportation: Analysis of the Decision Bases in the Case of Spanish Motorways of the Sea. *Sustainability*, Issue 6, pp. 1544-1566.

MAN Diesel & Turbo, 2012. *Basic Principles of Ship Propulsion*, s.l.: MAN Group.

Markandya & Wilkinson, 2007. *Electricity generation and health*, s.l.: Lancet.

Martino, A. & Brambilla, M., 2016. *Research for tran committee - The EU maritime transport system: focus on ferries*, s.l.: European Parliament's Committee on Transport and Tourism.

Miola, Ciuffo, Giovine & Marra, 2010. *Regulating Air Emissions from Ships*, Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea.

Moreno-Gutiérrez, et al., 2015. *Methodologies for estimating shipping emissions and energy*, s.l.: Elsevier.

Moreno-Gutiérrez, J., Durán-Grados, V., Uriondo, Z. & LLamas, J. A., 2012. Emission-factor uncertainties in maritime transport in the Strait of Gibraltar, Spain. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, Issue 5, pp. 5953-5991.

Moreno-Gutiérrez, et al., 2019. Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data. *Science of the Total Environment*, Issue 650, pp. 575-584.

OTLE, 2018. *El transporte internacional de mercancías en España*, s.l.: Observatorio del Transporte y la Logística en España.

OTLE, 2019. *Informe Anual 2018*, s.l.: Ministerio de Fomento.

Pallis, T., 2015. *Cruise Shipping and Urban Development: State of the Art of the Industry and Cruise Ports*, Greece: OECD.

Publicaciones UE, 2011. *Libro Blanco de la Comisión Europea*, Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Unión Europea.

RICARDO-AEA, et al., 2013. *Support for the impact assessment of a proposal to address maritime transport greenhouse gas emissions*, s.l.: European Commission - DG Climate Action.

Sjödin, Henningsson & Flodström, 2007. *Documentation of a Calculation Tool for Maritime Emissions*, s.l.: Sutranet. Swedish Environmental Research Institute.

Smith., et al., 2015. *Third IMO GHG Study 2014*, London, UK: International Maritime Organization (IMO).

Talanoa Dialogue - IMO, 2018. *ADOPTION OF THE INITIAL IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS AND EXISTING IMO ACTIVITY RELATED TO REDUCING GHG EMISSIONS IN THE SHIPPING SECTOR*, s.l.: International Maritime Organization to the UNFCCC Talanoa Dialogue.

UNCTAD, 2018. *Informe sobre el Transporte Marítimo*, s.l.: Conferencia de la Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo.

WHO, 2012. *Burden of disease from Household Air Pollution for 2012*, s.l.: World Health Organization.



## **ANEXO I**

## **ANEXO I**

### **PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**

La realización de esta tesis doctoral se ha desarrollado bajo el marco del Proyecto de la Consejería de Salud de la Junta de Andalucía que lleva por título: **"La influencia del transporte marítimo sobre la salud humana: propuesta de modelo de cálculo de predicción de muertes y hospitalizaciones anuales en la provincia de Cádiz"**. Referencia PI 0094-2017. Proyecto cofinanciado por fondos FEDER.

Referencia Proyecto: PI-0094-2017	
Referencia Convocatoria:	2017-074 / PV / ITI-CADIZ-PR / PR
Fecha Solicitud:	
Fecha Adjudicación:	20/12/17
Fecha Inicio:	30/12/17
Fecha Fin:	29/09/20
Fecha Denegación:	
Título del Proyecto:	LA INFLUENCIA DEL TRASPORTE MARÍTIMO SOBRE LA SALUD HUMANA. PROPUESTA DE UN MODELO DE CÁLCULO DE PREDICCIÓN DE MUERTES Y HOSPITALIZACIONES ANUALES EN LA PROVINCIA DE CÁDIZ.
Categoría en el Proyecto:	Investigador UCA
Costes Directos:	180.648,20 €
Costes Indirectos:	16.723,80 €
Cantidad Concedida:	197.372,00 €

Este trabajo de tesis doctoral está también respaldado por el Proyecto “**Master Plan for Spanish Ports 2015-EU-TM-0417 OPS,22**” co-financed by the EU Connecting Europe Facility CEF -RET-T EU

Referencia Proyecto: 1128893	
Referencia Convocatoria:	2016-059 / PE / CEF-T / PR
Fecha Solicitud:	16/02/16
Fecha Adjudicación:	08/07/16
Fecha Inicio:	01/11/16
Fecha Fin:	31/12/19
Fecha Denegación:	
Título del Proyecto:	Masterplan for OPS in Spanish ports
Categoría en el Proyecto:	Profesor sustituto interino
Costes Directos:	10.000,00 €
Costes Indirectos:	
Cantidad Concedida:	10.000,00 €



## **ANEXO II**

## **ANEXO II**

### **ARTÍCULO PUBLICADO**



Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv)

## Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data

Juan Moreno-Gutiérrez <sup>a,\*</sup>, Emilio Pájaro-Velázquez <sup>a</sup>, Yolanda Amado-Sánchez <sup>a</sup>, Rubén Rodríguez-Moreno <sup>a</sup>, Fátima Calderay-Cayetano <sup>b</sup>, Vanesa Durán-Grados <sup>a</sup>

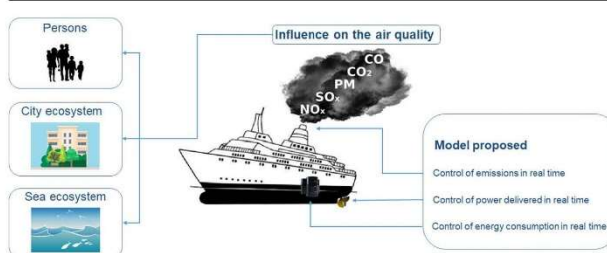
<sup>a</sup> University College of Marine, Nautical and Radio-Electronic Engineering, Energy Efficiency in Maritime Transport Research Group, University of Cadiz, Campus de Excelencia Internacional del Mar, Spain

<sup>b</sup> Superior College of Engineering, Energy Efficiency in Maritime Transport Research Group, University of Cadiz, Campus de Excelencia Internacional del Mar, Spain

### HIGHLIGHTS

- Ships' energy and emission inventories are subject to many significant uncertainties.
- Models for calculating ship's energy and emissions in real-time have been proposed.
- Models for monitoring delivered power in real-time have been proposed.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 21 July 2018

Received in revised form 3 September 2018

Accepted 3 September 2018

Available online 05 September 2018

Editor: D. Barcelo

### ABSTRACT

With the aim of more reliably measuring ships' fuel consumption and emissions several different estimation methods have been put forward and are in use but there is ongoing debate still on the best way to measure maritime emissions. Fuel and emissions monitoring are already a common practice in the shipping industry. But there are currently neither harmonised guidelines nor legal requirements that clearly define the method and the rules to follow to monitor on-board fuel consumption for each situation during navigation.

In this context, this article describes and compares four existing methods (EPA, IMO, Jalkanen and MAN) for calculating energy consumption and emissions, and presents a more realistic method, based on a case study. The purpose is to examine the differences between all of these methods, in order to propose the most suitable method

**Abbreviations:** AE, auxiliary engine; AIS, automatic identification system; Bottom-up, inventory methodology type; Cruise mode emissions, in the near-port analysis these are produced while the ship is within 25 nautical miles of the end of the SRZ lanes; Dwt, deadweight ton; EEA, European Environment Agency; EF, emission factor; ENTEC, Environmental Engineering Consultancy; EPA, Environmental Protection Agency (USA); GHG, greenhouse gas; HFO, heavy fuel oil; HOTELING, this provisioning operation (also known as dwelling) takes place while the vessel is docked or anchored near a dock; HSD, high speed diesel (engine type); IHS, Register of Ships Directory; IMO, International Maritime Organization; LF, load factor (percentage of the engine's total MCR power); LRIT, long range identification and tracking of vessels; MANOEUVRING, these are operations carried out in close proximity to the dock; IN PORT (SRZ), Manoeuvring that occurs within Port at limited speed; MCR, maximum continuous rating; MDO, marine diesel oil; MEPC, Marine Environment Protection Committee (IMO); ME, main engine; MFO, medium fuel oil M; MRV, monitoring, reporting and verification emissions; MSD, medium speed diesel (engine type); MW, mega watts; nm, nautical mile; Noon Report, daily on-board data sheet; PM, particulate matter; ROB, fuel oil remaining; RoPax, ship type designed principally for freight vehicle transport (roll-on) but with accommodation for passengers; RoRo, roll-on roll-off vessels that are used to carry wheeled cargo; SFOC, specific fuel oil consumption; SRZ, speed-restricted zone; SSD, slow speed diesel (engine type); tonne, a metric unit of mass equal to 1000 kg, also known as a metric ton.

\* Corresponding author.

E-mail address: [juan.moreno@uca.es](mailto:juan.moreno@uca.es) (J. Moreno-Gutiérrez).

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.045>

0048-9697/© 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

**Keywords:**  
Shipping energy  
Shipping emissions  
Ro-Pax  
Ship energy load factors  
Emission factors

of obtaining the data needed for better energy management, and a method that can be applied to any type of ship. The case study was carried out on Ro-Pax ships, comparing these four different methods through the application of a bottom-up integrated system approach. The study describes in detail and applies the most complete methodology for calculating energy consumption and emissions during cruising, operating in a Speed Reduction Zone (SRZ), manoeuvring and berthing.

Application of the new improved method proposed in this paper could be the first step in implementing operational measures for detecting both abnormal high emissions and abnormal fuel consumption. The application of this method does not, in itself, reduce fuel use or improve efficiency, but it should be the necessary first step to establish uniform operational measures that will improve the management of energy on board ship and monitor accurately the performance of the fleet.

© 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Shipping-related emissions are one of the major contributors to global air pollution, especially in coastal areas (Viana et al., 2014). These emissions contribute significantly to air pollution in the vicinity of harbours (Eyring et al., 2010); another significant finding is that over 70% of total ship emissions can spread up to 400 km inland. They can also cause an increase in the levels and composition of both particulate and gaseous pollutants, as well as the formation of new particles, in densely populated regions (González et al., 2011).

It is estimated that particles emitted specifically by ships caused around 87,000 cardiopulmonary and lung-cancer deaths each year worldwide (Winebrake et al., 2009). This atmospheric pollution has particularly strong and consistent associations with both mortality and morbidity, and with respiratory infections and asthma in young children (WHO, 2012). Calazzo et al. (2013) estimated that shipping contributed 3500 premature deaths from PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> pollution across the US in 2013, while Huan et al. (2016) estimated 14,500–37,500 premature deaths per year due to shipping across East Asia. The WHO in 2013 considered that the relationship between PM emitted as primary pollutants and deaths produced must be expressed as a supra-linear function, whereas other authors (Penn et al., 2017; Krewski et al., 2009 and Lepeule et al., 2012) assume this relationship to be a linear function.

In this study, the origin of these pollutants emitted is essentially the combustion of fuel by the ship's engines. A detailed analysis is made of four existing methods and a new method is proposed, that will provide the operators of a ship with quantified information on the pollutants emitted by the ship in real time, so that they may also be aware of the number of deaths that may be produced by this pollution.

The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), Annex VI Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships (which includes 18 regulations, from application to fuel oil availability and quality), was established by the International Maritime Organization (IMO) as the global strategy for mitigating shipping emissions (Ling-Chin and Roskilly, 2016); it defines the methodology to be used for recording the energy and emissions inventories of ships. However, the issue of how best to calculate a ship's emission inventory is much debated, and contradictory papers have been published over the last ten years (Durán-Grados et al., 2018).

In the present study, the authors propose a new method based on the other four which removes all of these uncertainties, since it is based on a bottom-up method, it applies an original approach to estimating a ship's energy consumption and emissions from its operations each day during each voyage, using operational data, and it gives calculated emissions of greenhouse gases (GHG's) and particulate pollutants, instead of analyses carried out using calculations of generalised maritime activity for categories of ships. The proposed method will also be useful for application in the new concept of the **Monitoring, Reporting and Verification (MRV) of emissions** by Maritime Transport (MRV Shipping Regulation, 2015).

This proposed method removes the uncertainty attributable to the use of fuel oil consumption average values and represents a substantial improvement in the reliability and accuracy of aggregate data on shipping activity, energy demand and emissions. Four different methods and equations for calculating energy consumption (possibly using oil flowmeters by consumers) and emissions have been studied and compared, and the results are used to propose an original method that can be applied to all types of ships. The validity of fuel consumption should be compared on a periodic basis through comparison with the fuel figures derived from flowmeters (if available) and tank soundings. The ship operator's maintenance records should provide guidance on comparison frequency.

As an illustrative case study, the existing and proposed methods have been applied to a Ro-Pax ship operating in the waters of the Strait of Gibraltar (Spain), no shallow waters and no ECA (Environmental Control Area) transit.

The proposed models are based on theoretical emission factors like the other inventories published to date, but operators are able to perform on-board tests to calculate the deviation between the theoretical and actual emission factors. Furthermore the method proposed here calculates the fuel consumption for each category of ship's speed.

Given that the models of Krewski et al. (2009) and Lepeule et al. (2012) use a direct relationship between mortality and the precursor pollutants (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> and PM), in tons, emitted by ships, each shipping zone and type of shipping activity requires careful analysis, because the emission impacts of specific ships and specific routes differ quite significantly and will depend on a range of factors: route distance, ship capacity, service speed, engine power, average work load, type of fuel used, and fuel consumption.

This clearly suggests that each type of maritime transport service has to be evaluated individually (Jalkanen et al., 2009); and that is the approach taken here.

In order to measure as precisely as possible the amount of pollutants emitted to the atmosphere and, given the proximity to the coastal area in which the pollutants are emitted (in the case study the ships always travel in fixed lanes, no further than 13 nm from each port), the results from applying the proposed methods may help to define the air quality model in the study area. This is because, in the case of Maritime Transport, such assessments are based on air quality dispersion models in which the amounts of primary pollutants (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO and PM) that are emitted directly into the atmosphere are calculated by a bottom-up approach (inventories compiled from ship activity records and activity-based emission factors for different ship types); these data serve as the main input for the models (Matthias et al., 2010). The problem is that both air quality models and ships' emission inventories present many uncertainties. The method proposed in this study reduces scientific uncertainties in respect of emissions inventories and may help to define the air quality model in the study area more precisely.

Regarding our case study, the significance of this type of shipping activity in this area is clearly evident from the total fuel consumption by



maritime traffic in the Strait of Gibraltar: in 2007 it amounted to 290,000 t. Domestic traffic of Ro-Ro and Ro-Pax ferries accounted for 46% (134,810 t consumed) of this, and only while operating in cruising mode (Moreno-Gutiérrez et al., 2015).

Four energy and emission calculation methods were studied and compared for a series of complete individual voyages of a Ro-Pax ship in the Strait of Gibraltar, from leaving dock at the Port of Algeciras (Spain) to docking at the Port of Tangier (Morocco). The study took into account the ship's cruising speed, its reduced speed near to port, and the low-speed manoeuvring in port and berthing stages. The influences of currents, waves, wind, hull/propeller fouling, trim, cargo load and propulsion system efficiency (from the on-board database) were used for the application of the IMO method.

This could be the first step for monitoring accurately the performance of the fleet; it could, for instance, detect abnormal high emitters, thus providing information to the relevant authorities on the possible installation of equipment tampering and poor durability of pollution control systems fitted to the ship. This topic has been proposed by the European Commission for research in its H2020 projects.

## 2. Methodology

### 2.1. Description of the method

The so-called bottom-up, or activity-based method, was used in this study. The object of this method, applicable to all types of ship, is to estimate the emissions of each main pollutant by a particular ship, on a day-by-day basis, by accurately calculating its energy consumption. The method needs information on the ship's characteristics (vessel type and size, engine type, fuel type, total power installed and 100% MCR for main and auxiliary engines) and movements, as well as the corresponding fuel consumption figures and emission factors. The approach allows many possible variants, mainly depending on how the set of inputs is obtained and what models or other assumptions are used (David Segersson, 2013). In this case study, only data from the Ro-Pax Noon Report completed on board was used, and no AIS data was used. To date all models of emissions inventories previously published have used the AIS system that has many uncertainties (Smith et al., 2014), Table 1.

The method proposed by the authors uses the Goldsworthy and Galbally (2011) method for calculating Emission Factors, the Jalkanen et al. (2009) calculation for Specific Fuel Oil Consumption, the Basic Principles of Ship Propulsion (2012) model for defining a ship's power and speed relationship, and the IMO method for the calculation of actual main engine power. This method guarantees the highest level of data consistency and tries to serve as a first step towards a regulation on emissions reduction and can only be guaranteed if emissions data is easy to collect, survey and verify.

The data for previous years are unreliable due to uncertainty stemming from the ship activity data, essentially because of the lack of

satellite AIS data. Therefore that activity data has not been used in this study, because better information is available from the ship's Noon Reports (Daily on-board data sheet), Table 1.

Three primary sources of emission can be found on a ship: the main engine (ME), the auxiliary engines (AE) and the thermal boilers. The emissions from the boilers are the least significant and depend heavily on their size and the extent of their use. On container vessels, boilers are usually used for auxiliary hotel loads, whereas on crude oil lightering vessels the boilers are used when discharging the crude oil. Given that an oil boiler is not used on board the ship in the case studied, only energy consumption and emissions from the main and auxiliary engines, are quantified in this study.

Energy consumption and emissions from the main propulsion engine(s) ME(s) vary as a function of the engine's rated power output, load factor and build year. The main engine power output and load factor vary over time as a result of the ship's operational mode (e.g. at berth, anchoring, manoeuvring, reduced speed mode, cruising mode) (Aldous et al., 2013).

The bottom-up model applied in this study calculates these specifics (main engine power output and load factor) for each operational mode of the ship and for each trip. Energy consumption and emissions by the AEs vary as a function of auxiliary power demand (typically changing with each vessel operating mode), auxiliary engine rated power output, load factor and the engine build year.

Because the voyages in both directions (opposing) were taking place over short periods of time, the wind direction, wind speed, wave direction and wave height were not taken into account.

This study first calculates sea transport emission factors for GHG and pollutants ( $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ), and PM emissions, as well as fuel consumption. In this case, a specific Ro-Pax ferry serving the sea routes connecting mainland Southern Spain and Northern Africa was studied over a period of 2 months in 2017. It provided results from the application of four different methods (EPA, 2000; Smith et al., 2014; Basic Principles of Ship Propulsion, 2012 and Jalkanen et al., 2009). Based on these methods, a new method has been proposed by the authors, which is a combination of all four. The quantity of fuel consumed was compared with data from on-board records. Because the fuel consumption data is obtained from changes in tank levels, the results for the four methods show differences greater than 20% compared with the calculation using the new method proposed. Thereafter, the overall total levels of  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  and PM emissions and fuel consumption are calculated per voyage/trip.

The study was carried out on four different operational modes of the ship studied, for each complete voyage from/to each Port:

1. Cruising (for between 0.98 and 1.25 h, on-board database).
2. Slow steaming, in Speed Restriction Zones (1 mi at 12 knots, on-board database).
3. Manoeuvring into port (0.22 h at 9 knots, on-board database).

**Table 1**  
Comparison between uncertainties from using the AIS system and the new method proposed.

Uncertainties, quoted from Third IMO GHG Study, 2014	Proposed model
The uncertainties (particularly AIS data) remain, particularly in the estimation of the total number of active ships and the allocation of ships or ship voyages between domestic and international shipping.	The use of the models proposed in this paper removes any uncertainty attributable to the use of average values from AIS data.
In cases where data from AIS are missing, values are estimated either from interpolation or by referencing another publicly available data source.	No missing data in this study
It has recognized several ships for which there is no corresponding IHSF and activity data. Ships from domestic traffic are included in all emissions, but with high uncertainty because their technical characteristics cannot be given.	This problem is not possible in this proposal because only on-board data are used
The environmental conditions are not reflected to their full extent in the AIS-based modelling. It fails to take into account that the fuel consumption and emissions can easily double or triple in strong wind/bad weather conditions.	All the models proposed here take into account weather conditions and the condition of the ship's hull and propeller (data from on-board).
Uncertainty level (10%) within the Monitoring Plan for fuel oil measurement by manual sounding	Not applicable in this study

4. Arrival at and departure from berth (0.083 h at 3.1% LF/0.083 h at 3.9% LF, respectively, on-board database).

Average time per voyage: 2 h 10 min  
Average distance per voyage: 18.5 mi  
Number of voyages analysed: 405  
Number of voyages per year: 2,400

The on-board database (from the Noon Reports) includes the following parameters:

- ACTUAL SPEED FOR EACH MODE
- MAXIMUM DESIGN SPEED at 100% MCR: 19.2 knots
- MAXIMUM DRAUGHT FOR FULL LOAD [m]: 5.570 m
- DRAUGHT FOR EACH MODE [m]
- DWT: 4030 t
- VOYAGE DISTANCE SAILED
- SPECIFIC FUEL OIL CONSUMPTION (SFOC) BASE: 0.213 g/kWh and 0.210 g/kWh for RO and MDO respectively. Depending on the voyage stage, both values will be used as the base for the application of Eqs. (6) and (7).
- SPEED OVER GROUND FOR EACH MODE
- SPEED THROUGH THE WATER FOR EACH MODE
- TOTAL INSTALLED POWER Main engines ( $2 \times 5850$  kW, 100% MCR) and auxiliary engines (2500 kW, 100% MCR)
- TIME IN PORT
- TIME SAILING (Cruising, reduced speed, manoeuvring, arrival and departure)

TYPE OF FUEL FOR EACH SITUATION: as stated in the on-board design guide, the type of fuel used is RO for the main and auxiliary engines and MDO for the auxiliary engines (only in port). As stated in the on-board database, 1978 kg of HFO and 168.5 kg of MGO were consumed in each trip.

Statistical data values have been inserted in Tables 20 and 21. The sample size was 160.

The bottom-up method usually provides an initial per-ship estimation of observed activity, energy consumption and emissions, but only on ships that appear concurrently in both the IHSF and AIS databases. This method combines activity data (derived from AIS and LRIT raw data sources) and technical data (derived from IHS, see Eqs. (1) and (2)). This method has several uncertainties. Our main aim is to reduce these uncertainties by applying explicit quality control to calculate fuel use and emissions using the technical details of each specific vessel.

One significant uncertainty is the calculation of the LF of the ME (see Eq. (3)), a second concerns the equations used for calculating fuel consumption (see Eqs. (6) and (7)) and a third is the value of the EF (see Eq. (8)) used for calculating the total emissions per pollutant. Both parameters are taken as constant values in most previous studies but in actual fact, they both depend on the specific LF, of both the ME and AE.

One important contribution of the proposed method to reducing uncertainty is the direct observation of activity data for each individual vessel, e.g. speed and draught.

On this point, the power output of the main engines is dependent on the propulsion speed of the ship (Eq. (3)), under the assumption that friction parameters are ship-specific constants. It should be noted that this method only requires knowledge of two parameters: power and ship speed at 100% MCR from the on-board test. However, Jalkanen et al. (2009) also introduce a safety margin of 0.5 knots to account for ship speeds, as recorded in the AIS (see Eq. (4)), that sometimes exceed the stated maximum. In the study described here, it was not necessary to use the AIS data because the Noon Report was used, as already stated in this methodology section. The Noon Report data represent a low resolution dataset (the sampling frequency is approximately every 24 h) from which it is possible to extract the principal variables required to define a ship's performance in terms of fuel consumption. Furthermore, a ship's actual performance needs to be measured in order to assess the fuel savings that may be achieved from management and technological interventions (Trozzi and de Lauretis, 2013), Table 2.

The methodology used here calculates the total emissions and energy consumption by summing the emissions on a trip-by-trip basis. A single trip was considered to be from when the ship was at berth in the port of origin (A), up to the time of its departure from the port of destination (B). The energy consumption and the emissions are expressed as follows:

- During docking, manoeuvring, departure from port A
- During docking, manoeuvring, arrival in port B
- During manoeuvring into port A
- During manoeuvring into port B
- During slow steaming, in SRZ zone on leaving port A
- During slow steaming, in SRZ zone on approaching port B
- During cruising

The same sequence from Port B to Port A was also analysed.

## 2.2. General equations to use

The use of configurable expressions makes the emission calculations very flexible. For most users, the expressions already provided in the system will be the ones they use for the calculations. It should be noted that the methods currently used have been chosen based on the available input data.

Eqs. (1), (2) and (3) have been used in all the ship energy and emissions inventories published to date. This approach is consistent with the methodology proposed by the EEA (Trozzi and de Lauretis, 2013) and the methodology outlined by the U.S. EPA-420-R-10-013 (2010). Both methodologies usually require use of both the AIS system to calculate the activity time and the Lloyd's Register (IHS Fairplay) data for the ships' characteristics (Andersen et al., 2005).

In Eq. (1), ME signifies the Maximum Continuous Rating (MCR) for a main engine when an energy and emission inventory is applied, for a specific zone. This data is extracted from the IHS Fairplay for each ship. The problem lies in knowing or calculating the LF value. Although a ratio of 80% at sea to 20% while manoeuvring is common in the

**Table 2**  
Comparison between all the methods.

Method	Power delivered	SFOC	Emission factor	Relation-ship between speed and power, n
EPA	$P_{transient} = P_1 \left( \frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n$	Constant value depending on the type of engine	ARB, ENTEC (2002)	Constant value, n = 3
IMO	$P_{transient} = \frac{P_1 \Delta_{transient} \left( \frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n}{V_{base} \Delta_{base}}$	Variable (Eqs. (6) and (7))	IMO	Constant value, n = 3
Jalkanen	$P_{transient} = E_p * P_{installed} \left( \frac{V_{transient}}{V_{design} * V_{speedy}} \right)^n$	Variable (Eqs. (6) and (7))	ENTEC (2002)	Constant value, n = 3
MAN	$P_{transient} = P_1 \left( \frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n$	Constant value depending on type of engine	NA	Variable depending on the type of ship
Proposed	$P_{transient} = \frac{P_1 \Delta_{transient} \left( \frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n}{V_{base} \Delta_{base}}$	Variable (Eqs. (6) and (7))	Compilation of ARB, ENTEC (2002), EMEP/EEA and IPCC	Variable depending on the type of ship



literature [EMEP/EEA, 2016], in Eq. (3) most authors suggest that  $n = 3$  be used for all types of ship and for all types of operating mode.

In a previous study (Basic Principles of Ship Propulsion, 2012), it suggested that the exponent “ $n$ ” should be expressed as a variable value that depends on the type of ship when a propeller is used as the propulsion system. The use of Eq. (4) makes sense if the AIS system is used but it is not recommended when Noon Reports are used, given that ship speed is data collected on-board and in real time.

Eq. (5) from the Smith et al. (2014) introduces additional parameters (draught, propulsion efficiency due to weather, and the modification of propulsion efficiency due to fouling) for the calculation of the transient power when the ship is propelled by propellers, but it also uses the constant value of  $n = 3$ .

If more detailed information about a ship's characteristics is available, it is evident that more specific expressions that make use of this should be implemented in order to improve the calculations. An example of this would be to include dependency on engine load in emission factors for pollutants (Eq. (8)) and specific fuel consumption (Eqs. (6) and (7)), both of which are taken as constant values in the existing methods.

The method proposed in this paper uses Eq. (5), taking into account that “ $n$ ” is a variable value which depends on the type of ship. All the variables shown in this equation can be taken from on-board data.

#### 2.2.1. Calculation of energy consumption

$$\text{Energy} = \frac{D}{V} [(ME.LF_{ME}.SFOC) + (AE.LF_{AE}.SFOC)] \quad (1)$$

where:

- D (miles): Distance that the ship travels within the study area
- v (knots): Average speed of the ship
- Activity time: ( $\frac{D}{v}$ ) (hours)
- ME (kW): Maximum continuous rating (MCR) for a main engine.
- $LF_{ME}$  (fraction): Load factor for a main engine as a fraction of the MCR
- AE (kW): Maximum continuous rating (MCR) for an auxiliary engine
- $LF_{AE}$  (%): Load factor for an auxiliary engine as a fraction of the MCR

#### 2.2.2. Calculation of total emissions

$$\text{Emissions} = [(ME \text{ Energy}).EF_{ME} + (AE \text{ Energy}).EF_{AE}] \quad (2)$$

where:

- ME Energy and AE Energy (kWh): ME,  $LF_{ME}$  and AE,  $LF_{AE}$  from Eq. (1)
- $EF_{ME}$  ( $g[kWh]^{-1}$ ): Emission factor for a main engine, for the pollutant in question (varies by engine type and fuel consumed rather than by activity mode)
- $EF_{AE}$  ( $g[kWh]^{-1}$ ): Emission factor for an auxiliary engine, for the pollutant in question.

#### 2.2.3. Calculation of load factors

The general equation for calculating the Main Engine Load factor is described in Eq. (3)

$$LF = \frac{P_{transient}}{P_1} P_{transient} = P_1 \left( \frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n \quad (3)$$

where:

- $P_1$  and  $V_1$  are power and ship speed respectively at 100% MCR from the on-board test (Winebrake et al., 2009);  $V_{transient}$  is actual ship speed;  $P_{transient}$  is the instantaneous power for calculation.

$n$  = the constant ship speed coefficient and represents the relationship between speed and power. EPA-420-R-10-013 (2010) uses a constant value of  $n = 3$  for all types of ships.

However, the relationship between a ship's power and speed often results in a higher power ( $n$ ) than three. Usually, the relationship used for estimating the LF for MAN Diesel and Turbo MEs (2012) is as follows:

- For large, high-speed ships such as container vessels:  $n = 4.0$ .
- For medium-sized, medium-speed ships such as feeder container ships, reefers, Ro-Ro ships, etc.:  $n = 3.5$ .
- For low-speed ships such as tankers and bulk carriers:  $n = 3.2$ .

Since this study was designed for a Ro-Pax ship, a value of  $n = 3.5$  is used.

#### 2.2.4. Calculation of power transient

Jalkanen et al. (2009) proposes Eq. (4) to calculate the power transient of the main engines (STEAM method)

$$P_{transient} = \epsilon_p * P_{installed} \left( \frac{V_{transient}}{V_{design} + V_{safety}} \right)^3 \quad (4)$$

where:

- $P_{installed}$  is the total installed power (kW) of the main engine(s), and  $V_{design}$  and  $V_{safety}$  are the design speed and the safety margin (in m/s), respectively. The  $\epsilon_p$  is assumed to be equal to 0.8, as the maximum continuous rating of the engine is thought to be 80% of the total installed main engine power (kW). In this equation, propeller efficiency is considered to be a constant, as well.

However, as can be deduced from Eqs. (3) and (4), the power that the propulsion engines have to develop does not depend solely on the speed. In addition to the transit speed there are other factors that influence the power that these engines must develop in order to achieve that speed. Logically these other factors also influence both the fuel consumption and the emissions released. These factors are those that increase the resistance of the vessel to movement through the water (Smith et al., 2014), i.e. the following three factors:

- Increased draft and displacement.
- Worsening of weather conditions.
- Worsening of hull and propeller roughness (i.e. fouling condition).

On this point, the Smith et al. (2014) proposes an Eq. (5) for the calculation of the power transient of main engines, as follows:

$$P_{transient} = \frac{P_1 \left( \frac{t_{transient}}{t_1} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{V_{transient}}{V_1} \right)^n}{\eta_w \eta_f} \quad (5)$$

where:

- $P_t$ ,  $V_t$  and  $t_t$  are respectively the instantaneous (transient) power, speed and draught at time  $t$ ;  $P_1$ ,  $V_1$  and  $t_1$  are ship power, ship speed and draught respectively at 100% MCR, from the on-board tests;  $\eta_w$  is the modification of propulsion efficiency due to weather;  $\eta_f$  is the modification of propulsion efficiency due to fouling; and  $n$  is an index that represents the relationship between speed and power,  $n = 3$ . This uses the Admiralty formula, which assumes that power is related to displacement to the power of 2/3.

Given that the difference between speed through the water and speed over ground were constant values,  $\eta_w$  was considered constant, as was the  $\eta_f$  value.

For the input values, this modelling approach uses the position reports generated on-board a ship each trip. The data from the 2011 reports was extracted. This area of the sea is well represented in this data.

The energy consumption and emissions figures presented in this paper are evaluated based on the four different models above.

#### 2.2.5. Calculation of energy consumption

Eqs. (6) and (7) were applied in the calculation of Energy Consumption.

$$\text{SFOC} : \text{SFOC}_{\text{Relative}} \times \text{SFOC}_{\text{base}} \quad (6)$$

$$\text{SFOC}_{\text{Relative}} : 0.455 \text{ LF}^2 - 0.71 \text{ LF} + 1.28 \quad (7)$$

where:

LF: Load Factor, a value from 0 to 1  
SFOC: Specific Fuel Oil Consumption  
SFOC<sub>base</sub>: From design guide

#### 2.2.6. Calculation of emission factors

Emission factors are used in conjunction with energy or fuel consumption to estimate emissions, and will vary by pollutant, engine type, duty cycle and fuel. Emission quantities are used to produce emission factors in g/kWh and/or grams of pollutant per gram of fuel consumed. The baseline fuel for producing the bottom-up emission factors is defined as HFO fuel and this has a sulphur content of 2.5%.

Internationally, there is no agreement about the values to apply to the emission factors. For example, IPCC (2006) recommends emission factors in its guidelines, the EU has the EMEP EEA (2016) data base emission factors. On the other hand, the Starcrest Consulting Group (2004), the European Parliament and Council (2010), Cooper and Gustafsson (2004) and the EPA (2000) have published other values to apply to the emission factors. A compilation of all of these (Goldsworthy and Galbally, 2011) is shown in Table 3 for its application in this study.

It is very important to note that the emission factor for each pollutant and engine type, expressed in g/kWh (see Table 3), takes a constant value when the ME loading is between 100% and 20%. For ME loadings of less than 20%, Eq. (8) was applied, as follows:

$$y = a(\text{LF})^{-x} + b \quad (8)$$

where:

y = emissions in g/kWh  
a = coefficient  
b = intercept  
x = exponent (negative)

### 3. Results and discussion

The fundamental objective of this study is to reduce as much as possible the uncertainties that will exist in the emissions inventories of

ships when they are calculated making use of the AIS for positioning (i.e. changes in ships' positions over a known time period) and a database of the characteristics of a ship's engines, including data of a ship's characteristics when those of the engines are not known. Both of these uncertainties are eliminated. However, there are other parameters employed in this study that, in addition, use values closer to reality, as can be observed in the results reflected in the tables.

In Eq. (1), which defines the energy consumption, there are two decisive factors: the Load Factor and the specific fuel consumption. Since the Load Factor of the Main Engines is related to the real instantaneous power developed by these engines, the most precise possible definition of this power will ensure that these calculations are as close as possible to the true values, because normally the emissions inventories attributed to maritime transport are based on mean values of these load factors.

For example, the Smith et al. (2014) utilizes a criterion to define the Load Factor for the main engines, in the following way:

#### Speed Mode

Less than 1 knot At berth  
1 knot to 3 knots Anchored  
Greater than 3 knots  
and less than 20% MCR Manoeuvring  
Between 20% MCR  
and 65 % MCR Slow-steaming  
Above 65 % MCR Normal cruising

With such wide margins as these, uncertainties in the values increase very significantly. For example, Table 10 (Supplementary material) gives values for the Main Engine's Load Factors ranging from 50 to 59.3% in the normal cruising operating mode: the Load Factor does not reach 65%. In the case of manoeuvring, values are between 8.9 and 9.3%, not coming close to 20% which is taken as the average value when the vessel is in the manoeuvring situation. These examples give a measure of the importance of try to get as close as possible to reality, and not resort to using average values. In the case of SFOC, the values defined in the Smith et al. (2014) (0.215 g/kWh) were practically the same as those employed in the present study. In this case, the SFOC (Table 10) was calculated by applying Eqs. (6) and (7), based on 0.213 g/kWh and 0.210 g/kWh for HFO and MDO values respectively. It can be seen that these values are variable depending on the load. The Load Factor values were calculated based on the actual ship speed.

It can be seen from the above that the results for each pollutant and each method shown in the tables and figures could vary significantly if the mean values defined in the Smith et al. (2014) were employed.

Tables 3 and 4 show the results for Main and Auxiliary Engines total emissions (kg) for each of the pollutants studied and for each of the methods, including the proposed method.

**Table 4**  
Method proposed: emissions (total and by operating mode) by auxiliary engines (kg) for each pollutant studied (same as IMO method).

Mode	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Cruising (HFO)	285.7	0.45	5	5.97	0.61	0.6
Speed reduction (HFO)	35.13	0.055	0.615	0.735	0.075	35.13
Manoeuvring	163.68	0.272	0.54	3.44	0.094	0.086
MDO	173.88	0.26	3.04	3.64	0.37	0.36
Arrival	31.7	0.052	0.1	0.66	0.018	0.016
HFO	33.67	0.052	0.59	0.7	0.072	0.069
Departure	30.88	0.051	0.1	0.65	0.017	0.016
MDO	32.81	0.05	0.57	0.68	0.07	0.068
At berth (MDO)	413.37	0.68	1.37	8.68	0.23	0.21
Total	1200.82	1.922	11.925	25.155	1.556	1.498

\*Sample size: 160.

**Table 3**  
Method proposed: Emissions (total and by operating mode) by Main Engines (kg) for each pollutant studied.

Mode	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Cruising	3771	8.62	65.60	113.1	9.372	9.12
Speed reduction	238	0.56	4.10	7.06	0.57	0.57
Manoeuvring	621.14	1.4	10.8	18.6	1.44	1.5
Arrival	18.6	0.26	0.32	1.57	0.197	0.19
Departure	22.86	0.266	0.397	1.54	0.18	0.17
At Berth	—	—	—	—	—	—
Total	4671.6	11.106	81.217	141.87	11.759	11.55

\*Sample size: 160.



**Table 5**

Specific fuel oil consumption by auxiliary engines (g/kWh), by operating mode, from each of the four previous methods analysed.

Mode	Auxiliary engines specific fuel oil consumption (g/kWh)							
	IMO		EPA		MAN		Jalkanen	
	HFO	MDO	HFO	MDO	HFO	MDO	HFO	MDO
Cruising		248		210		210		248
SRZ		248		210		210		248
Manoeuvring	224	221	213	210	213	210	224	221
Arrival at berth	224	221	213	210	213	210	224	221
Depart. from berth	224	221	213	210	213	210	224	221
At berth		213.7		210		210		213.7

Tables 5 and 6 show the specific fuel oil consumption and the energy consumption respectively for the AE, based on the LF (average values) for each mode.:

- Cruising and SRZ modes (HFO): 15% of maximum continuous rating (MCR).
- Manoeuvring, arrival and departure modes (MDO and HFO): 45% of MCR.
- At berth (MDO): 60% of MCR.

The difference between the results of the different methods is because the Smith et al. (2014) and Jalkanen et al. (2009) methods use Eqs. (6) and (7), while the EPA (2000) and MAN Diesel and Turbo (2012) methods use constant values for the SFOC.

Because the EFs have the same values for all methods, the results maintain the same relationship between Delivered Power and Energy Consumption. Table 7 shows the total Energy Consumption by Main and Auxiliary Engines. The results shown in this table could be substantially different if mean values had been used.

Tables 8 and 9 (Supplementary material) show the results of the studies, carried out by Goldsworthy and Galbally (2011), that define the EF values based on studies referenced in other articles (David Segersson, 2013). Since most previous authors have taken the SFOC as a constant value, and since the ship speed is taken from AIS data (with its inevitable uncertainties), it can be deduced that the calculation procedure proposed is more exact than other calculation methods using constant SFOC and Load factors.

Table 10 (supplementary material) show the Specific Fuel Oil Consumption obtained by applying the equations from each of the five methods analysed for Main Engines.

Table 11 (supplementary material) shows results from Eqs. (1)–(5), depending on the method applied. The biggest differences are seen in Cruising and SRZ modes. The lowest values correspond to the MAN and proposed methods, to which the same reasoning as for Table 6 can be applied.

**Table 6**

Energy consumption (kg of fuel) by auxiliary engines, by operating mode, from each of the four previous methods analysed.

Energy consumption by auxiliary engines (kg of fuel)				
MODE	IMO	EPA	MAN	Jalkanen
Cruising	96.85	81.82	81.82	96.85
SRZ	12.6	10.64	10.64	12.6
Manoeuvring	MDO	54.7	51.96	54.7
	HFO	55.48	52.7	55.48
Arrival berth	MDO	10.59	10.06	10.59
	HFO	10.74	10.20	10.74
Departure berth	MDO	10.32	9.80	10.32
	HFO	10.47	9.94	10.47
At berth, MDO (0.6 LF)	131.25	131.25	131.25	131.25
Total	337.52	368.37	368.37	337.52

\*Sample size: 160.

**Table 7**

Total energy consumption (by main and auxiliary engines), by operating mode, from each of the five methods analysed.

Total energy consumption (kg of fuel)					
Mode	IMO	EPA	MAN	Jalkanen	Proposed method
Cruising	1394.35	1452.87	1348.73	1403.1	1366.75
SRZ	95.068	92.834	73.38	116.44	105.68
Manoeuvring	MDO	54.7	51.96	54.7	54.7
	HFO	169.6	156.06	123.26	169.6
Arrival berth	MDO	10.59	10.06	10.06	10.59
	HFO	18.32	16.23	16.23	18.32
Departure berth	MDO	10.32	9.8	9.8	10.32
	HFO	19.72	17.32	17.32	19.72
At berth, MDO (0.6 LF)	131.25	131.25	131.25	131.25	131.25
Total	1903.918	1938.384	1781.99	1936.46	1886.93

\*Sample size: 160.

It can be seen that the ME power values on arrival in port and departure are consistent for all the methods. This is because constant LF values were used. However, these ME power values vary depending on which method is applied. In this case, the MAN method gives the lowest value. This is because the exponent  $n = 3.5$  was used while the other methods used  $n = 3$ .

The proposed method shows the lowest value for cruising mode and this value is very similar to that used in the MAN model for total ME power. The small difference between the MAN Diesel and Turbo (2012) and the proposed methods may arise because the MAN Diesel and Turbo (2012) method does not take into account draught or propulsion efficiency (which depends on weather and fouling). The same reasoning can be used regarding the calculation of Energy Consumption. Figs. 1 and 2 show the results from Table 11.

Tables 12 to 19 (Supplementary material) show the results for Main and Auxiliary Engines total emissions (kg) for each of the pollutants studied and for each of the methods, including the proposed method. Tables 20 and 21 show the Statistical analysis of ME and AE energy consumption and emissions, respectively.

Only the AEs use MDO fuel, and MDO is consumed during approximately 44% of the trip time. The rest of the time (56%), HFO fuel is used. Graph 5 shows the comparison between emissions from the two fuels. Even though there is only a minimal difference in the periods of time when each fuel is used, the emissions of SOx, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> are up to 400% higher when HFO is used (Figs. 3–5).

Currently, there are uncertainties in bottom-up calculations of energy use and emissions by the world fleet of ships. These uncertainties can affect the totals, the distributions among vessel categories and also the allocation of emissions between international and domestic shipping. One of this study's most important contributions to reducing uncertainty is the explicit quality control applied by calculating fuel use and emissions based on the vessel-specific on-board data (daily Noon Reports). This is superior to the calculation methods described in previous studies, which use average technical parameters. Another important contribution to the reduction of uncertainty is the direct observation of activity data for each individual vessel (i.e. speed, draught, etc.), aggregated per trip.

Other studies (Jalkanen et al., 2009; Smith et al., 2014 and Durán-Grados et al., 2018) have estimated greater uncertainty from the bottom-up method for previous years (2007, 2008 and 2009), with the difference between these uncertainty estimates being attributable predominantly to the change in AIS coverage over the period studied. In the proposed method the speed of the ship, distance travelled and time spent in each operating mode are measured and recorded on-board in real time; therefore the uncertainties arising from the use of the AIS system are also eliminated.

Another important contribution of this paper is that the analysis of the ME load factor, specific fuel oil consumption and emission factors

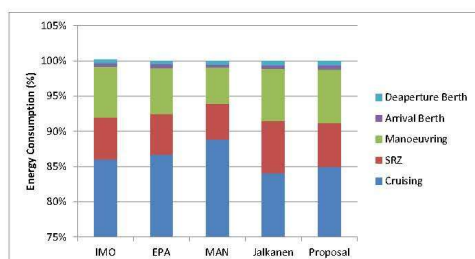


Fig. 1. Energy consumption by Main Engines, from each of the five methods: proportion of total accounted for by each operating mode (percent). Correction: Departure from berth, Arrival at berth.

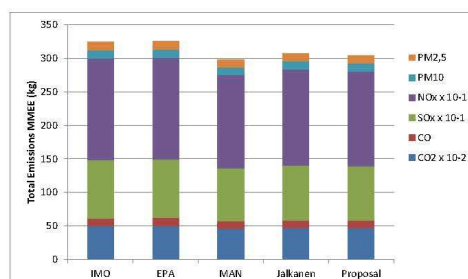


Fig. 3. Total emissions (kg) by Main Engines, from each of the methods analysed: proportion of total accounted for by each pollutant studied (percent).

is applicable to any type of ship. In this case study, they were applied to an actual Ro-Pax ship, whereas in previous studies these were taken as constant values. In this study it has been demonstrated that all these factors need to be taken into consideration as variables. We have also used the new IMO equation (Eq. (5)) for the calculation of the actual ME power, including three new parameters: displacement and propulsion efficiency (according to both weather and fouling conditions).

It can be seen that the results from the EPA and Jalkanen et al. (2009) methods are very similar but the results obtained by applying the proposed method should be considered as the closest to the true values.

In the first inventories produced, by the EPA (2000) and Smith et al. (2014) methods, the ME LF was like a third power relation between speed at 100% MCR and transient speed. The SFOC and EF were considered to be constant values, dependent only on the fuel type. Later, Jalkanen et al. (2009) added 0.5 knots to take into account the new safe transient speed value; and he applied a new model for calculating the SFOC as a variable value depending on the Engine Load. Then MAN Diesel and Turbo (2012) proposed different speed-power relation values for Load Factor calculations, depending on the type of ship. Lastly, the Smith et al. (2014) introduced three new factors that take into account the definition of the M.E power transient: displacement and propulsion efficiency allowing for both actual weather and the vessel's fouling condition. However, neither Jalkanen's safe speed value nor the different speed-power relation values proposed by MAN Diesel and Turbo (2012) were taken into account.

A new method that takes all the aforementioned parameters into account has been proposed here, thus producing a single equation that defines the transient Power.

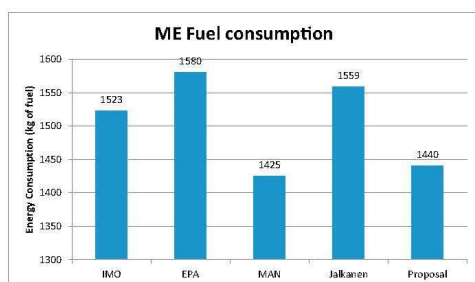


Fig. 2. Energy consumption by Main Engine (kg of fuel), from each of the five methods, for all operating modes.

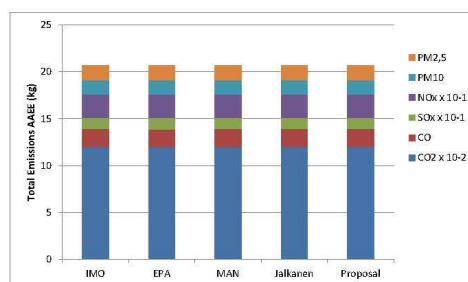


Fig. 4. Total emissions (kg) by Auxiliary Engines, from each of the methods analysed: proportion of total accounted for by each pollutant studied (percent).



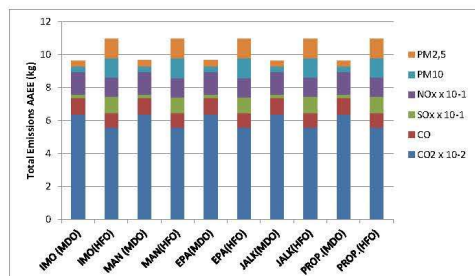


Fig. 5. Total emissions (kg) AE per pollutant and method studied and fuel used.

mode. When the speed is reduced by 3.5 knots, the ME fuel consumption is reduced by up to 50%. For the same case, when using the MAN Diesel and Turbo (2012), IMO and Jalkanen et al. (2009) models, the ME fuel consumption reductions are 46, 43 and 44% respectively. Hence, the data can be utilized and updated daily, instead of estimating a trip's fuel consumption using data from sea trials when the MEs are checked.

Finally, the presentation in this paper of the improved method proposed represents an opportunity for each ship operator to test it on their own fleet.

#### 4. Conclusions

Where fuel economy, cost efficiency and environmental responsibility are top priorities, making the correct decision on the method for measuring ship performance is extremely important. Given that ship operators have considerable information about ship performance from the daily reports, the application of any of the alternative methods should be easy for their respective companies. Based on this comparison of the four existing methods, the authors have proposed a new method combining the best of each. The new method is illustrated for a particular case but is suitable for any ship operator to test on their own fleet.

The range of variation between each method found in the estimation of total energy consumption and emissions of all types of pollutants is from 9% to 10%. In the Smith et al. (2014), the most important sources of uncertainty are attributable to incomplete AIS coverage of a ship's activity and the discrepancies between the number of ships observed in the AIS data and the number of ships described as "in service" in the IHSF database. These sources are not used when this method is applied; hence the uncertainties are practically non-existent compared to those inherent in previous studies, in which AIS data were generally used.

Given that distance, time and speed in service have been taken into account in this study, the application in itself of any of the analysed methods does not reduce fuel use or improve efficiency. However, obtaining reliable and timely data should be the first step to implementing operational and/or technical measures with a view to controlling emissions of pollutants, in order to contribute reliable data to a database for monitoring the emission of greenhouse gases by all ships on international routes.

By applying any of these methods, but particularly the method proposed by the authors, the energy consumption and emissions produced for each operational phase of the ship can be calculated in real time by its operator. This data would give operators better control, and improve management of the energy used on board their ships.

#### Acknowledgements

This work was carried out under the Project titled: "La influencia del transporte marítimo sobre la salud humana: propuesta de un modelo de cálculo de predicción de muertes y hospitalizaciones anuales en la provincia de Cádiz". Reference PI 0094-2017. Consejería de Salud de la Junta de Andalucía. Project Co-financed by FEDER Funds.

Work under the project is also supported by the Master Plan for Spanish Ports 2015-EU-TM-0417 OPS,22 co-financed by the EU Connecting Europe Facility CEF -RET-T EU.

#### Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.045>.

#### References

- Aldous, L., Smith, T., Bucknall, R., 2013. Noon report data uncertainty. Low Carbon Shipping Conference, London, 2013.
- Andersen, P.A., Borrod, A., Blanchot, S.B., 2005. Evaluation of the service performance of ships (review). *Mar. Technol.* 42 (4), 177–183.
- Basic Principles of Ship Propulsion, 2012. MAN Diesel and Turbo.
- Caiazza, F., Ashok, Akshay, Waitz, I.A., Yim, Steve H.L., Barrett, Steven R.H., 2013. Air pollution and early deaths in the United States. Part I: quantifying the impact of major sectors in 2005. *Atmos. Environ.* (ISSN: 1352-2310) 79, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.081>. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231013004548>.
- Cooper, D.A., Gustafsson, T., 2004. Methodology for calculating emissions from ship. SMHI, Norrköping.
- Durán-Grados, V., Mejías, J., Musina, L., Moreno-Gutiérrez, J., 2018. The influence of the waterjet propulsion system on the ships' energy consumption and emissions inventories. *Sci. Total Environ.* 631–632, 496–509.
- EMEP/EEA, 2016. Air Pollutant Emission Inventory Guidebook.
- ENTEC, 2002. Final Report. Quantification of Ship Emissions.
- EPA, 2000. Analysis of Commercial Marine Vessels Emissions and Fuel Consumption Data. Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency (420-R-00-002).
- EPA-420-R-10-013, 2010. Proposal to Designate an Emission Control Area.
- European Parliament and Council, 2010. Article 4b of council directive/020/EU.
- Eyring, V., Isaksen, I.S.A., Bernsten, T., Collins, W.J., Corbett, J.J., Endresen, O., Grainger, R.G., Moldanova, J., Schlager, H., Stevenson, D.S., 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: shipping. *Atmos. Environ.* 44, 4735–4771.
- Goldsworthy, L., Galbally, I.E., 2011. Ship engine exhaust emissions in waters around Australia - an overview. *Air Qual. Clim. Chang.* (ISSN: 1836-5876) 45 (4), 24–32.
- González, Y., Rodríguez, S., Guerra, J.C., Trujillo, J.L., García, R., 2011. Ultrafine particles pollution in urban coastal air due to ship emissions. *Atmos. Environ.* 45 (28), 4907–4914.
- Huan, L., Mingliang, F., Xinxin, J., Shang, Y., Drew, S., Faluvegi, G., Shindell, C., He, K., 2016. Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia. *Nat. Clim. Chang.* <https://doi.org/10.1038/nclimate3083>.
- IPCC Emission Factor Database (EFDB), 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jalkanen, J.P., Brink, A., Kalli, J., Pettersson, H., Kukkonen, J., Stipa, T., 2009. Modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 9209–9223.
- Krewski, D., Jerrett, M.R.T., Burnett, R.T., Ma, R., Hughes, E., Shi, Y., 2009. Extended Follow-up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air Pollution and Mortality. HEI Research Report/Health Effects Institute, Boston, MA, p. 140.
- Lepeule, J., Laden, F., Dockery, D., Schwartz, J., 2012. Chronic exposure to fine particles and mortality: an extended follow-up of the Harvard six cities study from 1974 to 2009. *Environ. Health Perspect.* 120 (7), 965–970.
- Ling-Chin, J., Roskilly, A.P., 2016. A comparative life cycle assessment of marine power systems. *Energy Convers. Manag.* 127, 477–493.
- Lloyd's Register (IHS Fairplay) (n.d.).
- Matthias, V., Bewersdorff, I., Aulinger, A., Quante, M., 2010. The contribution of ship emissions to air pollution in the North Sea regions. *Environ. Pollut.* 158 (6), 2241–2250.
- Moreno-Gutiérrez, J., Calderay Cayetano, F., Saborido, N., Boile, M., Rodríguez-Valero, R., Durán-Grados, C.V., 2015. Methodologies for estimating shipping emissions and energetic consumption: a comparative analysis of current methods. *Energy* 86 (15), 603–616.
- Penn, L.S., Arunachalam, S., Woody, M., Heiger-Bernays, W., Tripodis, Y., Levy, J.I., 2017. Estimating state-specific contributions to PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub>-related health burden from residential combustion and electricity generating unit emissions in the United States. *Environ. Health Perspect.* 125, 324–332. <https://doi.org/10.1289/EHP550>.
- Segerström, David, 2013. A dynamic model for shipping emissions. Adaptation of AirViro and application in the Baltic Sea. SMHI Meteorology, Vol. 153.
- Smith, T.W.P., Jalkanen, J.P., Anderson, B.A., Corbett, J.J., Faber, J., Hanayama, S., O'Keeffe, E., Parker, S., Johansson, L., Aldous, L., Raucci, M., Traut, M., Ettinger, S., Nelissen, D., Lee, D.S., Ng, S., Agrawal, A., Winebrake, J.J., Hoen, M., Chesworth, S., Pandey, A., 2014.

- Third IMO GHG Study 2014. International Maritime Organization (IMO), London, UK (April 2015).
- Starcrest consulting group, 2004. Port-wide Baseline Air Emissions Inventory. Port of Los Angeles.
- The MRV Shipping Regulation, 2015. Regulation (EU) 2015/757 on Monitoring, Reporting and Verification of Carbon Dioxide Emissions From Maritime Transport and Amending Directive 2009/16/EC.
- Trozzi, C., de Lauretis, R., 2013. Air Pollutant Emission Inventory Guidebook. European Environment Agency.
- Viana, M., Hammings, Colette, A., Querol, X., Degraeuwe, B., de Vlieger, L., Aardenne, J., 2014. Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe. *Atmos. Environ.* 90, 96–105.
- Winebrake, J.J., Corbet, J.J., Green, E.H., Lauer, A., Eyring, V., 2009. Mitigating the Health impacts of pollution from oceangoing shipping: an assessment of low-sulfur fuel mandates. *Environ. Sci. Technol.* 43 (13), 4776–4782.
- World Health Organization, 2012. Health Indicators of Sustainable Energy in the Context of the Rio+20 UN Conference on Sustainable Development Initial Findings From a WHO Expert Consultation: 1718 May 2012.

